



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

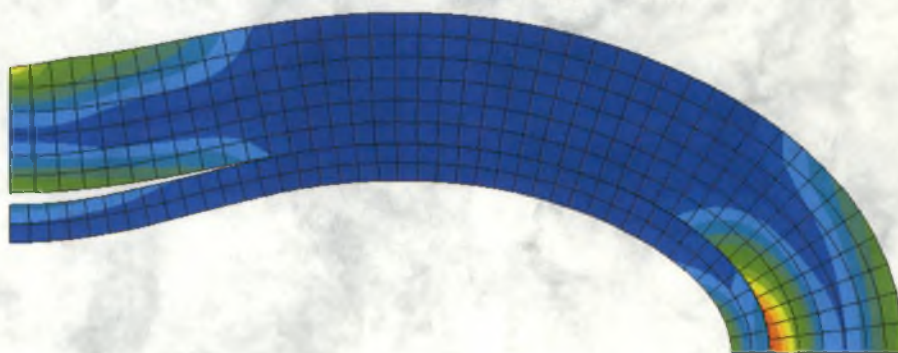
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ
ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ TFR ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.

Δανιήλ Βασιλικής



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Σ. Α. ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ : Δ. ΒΑΛΟΥΓΕΩΡΓΗΣ

Γ. ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ

Βόλος, Ιούλιος 2006



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	4811/1
Ημερ. Εισ.:	06-11-2006
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜΒ
	2006
	ΔΑΝ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

© 2006 Δανιήλ Βασιλικής

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν
υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Σπύρος Α. Καραμάνος
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
 Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης
 Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
 Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος
 Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε, την καθοδήγηση του, την συμβολή του στην αντιμετώπιση των δυσκολιών που ανέκυπταν και την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης για τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές του σε ακαδημαϊκά και όχι μόνο θέματα καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Επίσης είμαι ευγνώμων στους καθηγητές του τμήματος για τη γνώση που μου παρείχαν στη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα Σωτηρία Χουλιαρά για την γενικότερη βοήθειά της αλλά και την συμβολή της στην εκμάθηση του υπολογιστικού πακέτου Abaqus.

Ευχαριστώ επίσης τον συμφοιτητή μου Γιώργο για την εποικοδομητική συνύπαρξη στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών κατά τη διάρκεια των εργασιών μας καθώς και τους φίλους μου Γιάννη και Πατρίτσια για την βοήθεια, την ολόψυχη συμπαράσταση και τη συνεργασία τους.

Σημαντικό κομμάτι για μένα ήταν οι φίλοι μου. Τους ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου για τις στιγμές που περάσαμε μαζί αυτά τα πέντε χρόνια της φοιτητικής μας ζωής στο Βόλο.

Είναι σημαντικό όμως για μένα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που βοήθησαν να βρίσκομαι σήμερα σ' αυτό το σημείο. Ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Φωτεινό Ζάγορα για τον τρόπο σκέψης που μου ενέπνευσε, ο οποίος βασίζεται στην σοβαρή και συστηματική ενασχόληση και βρίσκει εφαρμογή σε όλες τις πτυχές της καθημερινής μας ζωής. Μου μετέδωσε το ενδιαφέρον και την αγάπη του για τις θετικές επιστήμες και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία μου στις εξετάσεις. Τέλος τον ευχαριστώ για τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευχαριστώ θερμά τον θείο μου Βασίλη Συμιακό για την καθοριστική συμβολή του στην επιλογή της σχολής. Αποτέλεσε πρότυπο για την ενασχόληση μου με τις τεχνολογικές επιστήμες, μεταδίδοντας μου πολύτιμες γνώσεις καθώς επίσης την σπουδαιότητα και την εφαρμογή τους. Ιδιαίτερα τον ευχαριστώ διότι βρίσκεται πάντα δίπλα μου πρόθυμος να με συμβουλευσει.

Πάνω απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και την υποστήριξή της, ηθική και οικονομική, όλα αυτά τα χρόνια.

Δανιήλ Βασιλικής

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ
ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ TFP ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Δανιήλ Βασιλικής

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2006

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σπύρος Α. Καραμάνος, Επίκουρος Καθηγητής
Υπολογιστικών Μεθόδων – Πεπερασμένων Στοιχείων των Κατασκευών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υποθαλάσσια τοποθέτηση αγωγών TFP με την μέθοδο reel-pipe laying αποτελεί μια νέα ελπιδοφόρο δυνατότητα για μείωση τους κόστους κατασκευής και τοποθέτησης αγωγών σε μεγάλα βάθη. Ο αγωγός διπλού τοιχώματος TFP (Tight Fit Pipe) αποτελείται από έναν λεπτότοιχο αγωγό υλικού ανθεκτικό σε διάβρωση ο οποίος εγκαθίσταται μηχανικά μέσα σε έναν χαλύβδινο αγωγό μεγαλύτερου πάχους μέσω μιας θερμο-υδραυλικής κατεργασίας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η διαδικασία κατασκευής του αγωγού διπλού τοιχώματος TFP και η αντοχή του σε εξωτερική πίεση με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η έρευνα εμβαθύνει στην επιρροή των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από την κατεργασία κατασκευής καθώς και στην επίδραση των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας στη δημιουργία των τάσεων αυτών. Επίσης υπολογίζεται η αντοχή του αγωγού TFP σε εξωτερική πίεση και εξετάζεται η επιρροή των παραμενουσών τάσεων, μέσω της μεταβολής των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας, στην αντοχή του αγωγού. Για την αριθμητική προσομοίωση των ανωτέρω πειραματικών διαδικασιών χρησιμοποιήσαμε το υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων “ABAQUS”.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή.....	1
1.1 Περιγραφή του προβλήματος	1
1.2 Ανασκόπηση προηγούμενων εργασιών	4
1.3 Στόχος της εργασίας.....	5

Κεφάλαιο 2

Ευστάθεια δακτυλίων υπό εξωτερική πίεση.

Αναλυτική λύση.....	7
2.1 Ευστάθεια λεπτότοιχων ελαστικών δακτυλίων.....	7
2.2 Ανάλυση ευστάθειας στους δακτυλίους.....	21
2.2.1 Περιγραφή δακτυλίων.....	21
2.2.2 Υπολογισμός κρίσιμων φορτίων.....	22

Κεφάλαιο 3

Ευστάθεια απλών δακτυλίων υπό εξωτερική πίεση.

Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.....	24
3.1 Περιγραφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	24
3.1.1 Τύπος στοιχείου.....	24
3.1.2 Συνοριακές συνθήκες.....	25
3.1.3 Ιδιότητες υλικού.....	27
3.2 Αριθμητική προσομοίωση δακτυλίων.....	29
3.2.1 Ανάλυση ιδιοτιμών για τον υπολογισμό της κρίσιμης ελαστικής πίεσης.....	30
3.2.2 Δακτύλιος με μικρή ατέλεια.....	30
3.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	32

Κεφάλαιο 4

Προσομοίωση αγωγού διπλού τοιχώματος.

<i>Διαδικασία κατασκευής.....</i>	35
4.1 Γενική περιγραφή.....	35
4.1.1 Διαδικασία κατασκευής σωλήνα TFP.....	35
4.1.2 Περιγραφή δακτυλίων.....	36
4.2 Αριθμητική προσομοίωση κατεργασίας.....	38
4.2.1 Περιγραφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	38
4.2.2 Θερμική διαστολή εξωτερικού σωλήνα.....	41
4.2.2.1 Αναλυτική λύση.....	41
4.2.2.2 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.....	43
4.2.3 Εσωτερική πίεση.....	44
4.2.4 Ψύξη εξωτερικού σωλήνα.....	45
4.3 Παραμένουσες τάσεις.....	46

Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση αγωγού διπλού τοιχώματος.

<i>Ευστάθεια υπό εξωτερική πίεση.....</i>	52
5.1 Αριθμητική προσομοίωση.....	52
5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	54
5.3 Εντατική κατάσταση.....	56
5.4 Επιρροή των φυσικών παραμέτρων.....	57
5.4.1 Διαφορά θερμοκρασίας.....	57
5.4.2 Εσωτερική πίεση.....	58

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση αγωγού διπλού τοιχώματος μεγάλου πάχους.....

6.1 Αριθμητική προσομοίωση σωλήνα TFP.....	59
6.1.1 Περιγραφή δακτυλίων.....	59
6.1.2 Ιδιότητες υλικών.....	61
6.1.3 Περιγραφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	63

6.2	Ευστάθεια δακτυλίων υπό εξωτερική πίεση.....	65
6.2.1	Αναλυτική λύση.....	65
6.2.2	Σύγκριση με πεπερασμένα στοιχεία.....	67
6.2.2.1	Ανάλυση ιδιοτιμών για τον υπολογισμό της κρίσιμης ελαστικής πίεσης.....	67
6.2.2.2	Δακτύλιος με μικρή ατέλεια.....	67
6.3	Κατεργασία κατασκευής.....	69
6.3.1	Θερμική διαστολή εξωτερικού σωλήνα.....	69
6.3.2	Εσωτερική πίεση.....	70
6.3.3	Ψύξη εξωτερικού σωλήνα.....	71
6.4	Παραμένουσες τάσεις.....	72
6.5	Εξωτερική πίεση.....	79
6.5.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	79
6.5.2	Εντατική κατάσταση.....	81
6.5.3	Επιρροή των φυσικών παραμέτρων.....	82
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

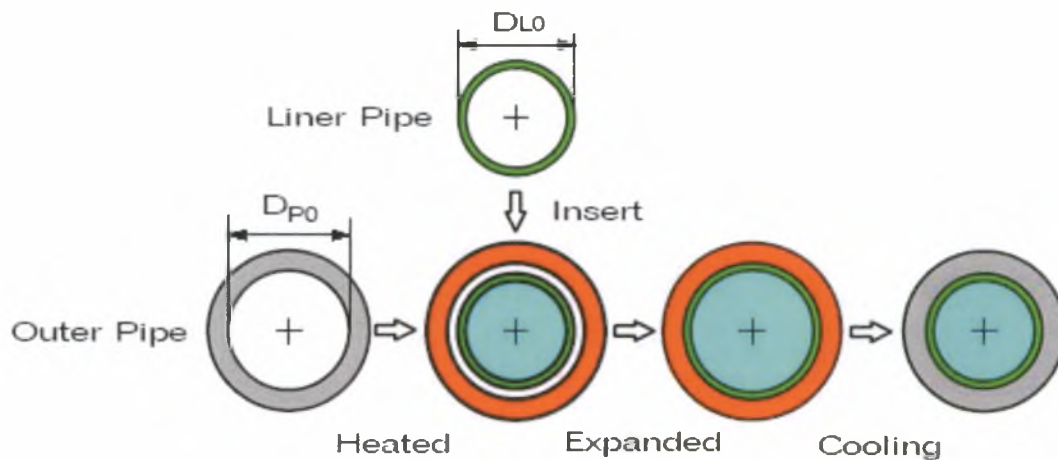
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο αυτής της διπλωματικής εργασίας, παρατίθεται μια ανασκόπηση της σχετικής με την εργασία βιβλιογραφίας και περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές ενότητες της διπλωματικής εργασίας.

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Μια ελπιδοφόρος δυνατότητα μείωσης του κόστους κατασκευής των υποθαλάσσιων αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων είναι η κατασκευή του αγωγού διπλού τοιχώματος TFP (Tight Fit Pipe, καταχωρημένη ονομασία από Kuroki T&P Co. Ltd.), όπου ένας εσωτερικός σωλήνας από κράμα ανθεκτικό σε διάβρωση CRA (Corrosion Resistant Alloy) εγκαθίσταται μηχανικά μέσα σε ένα χαλύβδινο εξωτερικό σωλήνα μέσω μιας θερμο-υδραυλικής κατεργασίας.

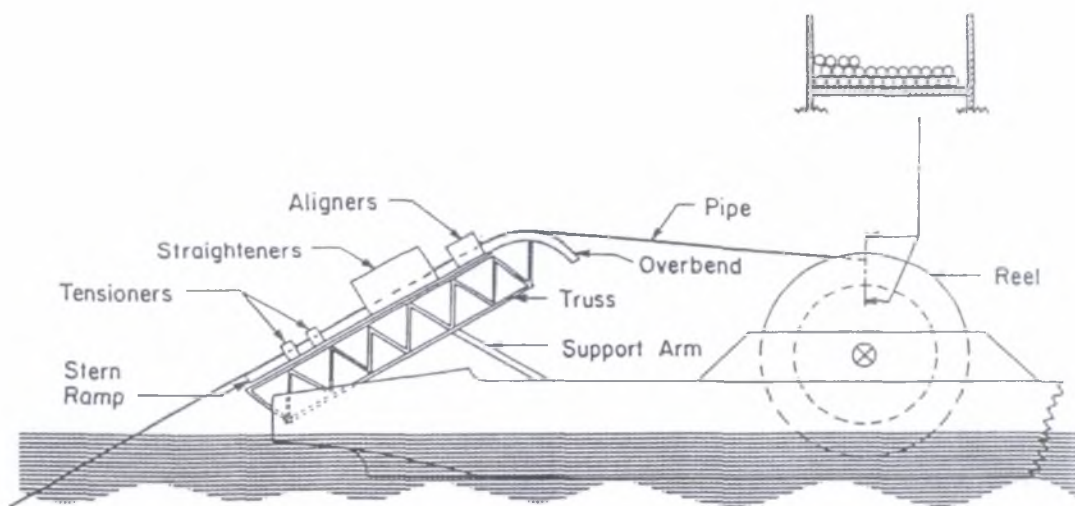
Η κατεργασία αυτή αποτελείται αρχικά από την θέρμανση του εξωτερικού σωλήνα με αποτέλεσμα τη διαστολή του. Στη συνέχεια και ενώ διατηρούμε τη θερμοκρασία στον εξωτερικό σωλήνα, εισέρχεται ο εσωτερικός σωλήνας ο οποίος διαστέλλεται λόγω της εσωτερικής πίεσης που του επιβάλλουμε. Επομένως οι 2 σωλήνες έρχονται σε επαφή και διαστέλλονται ταυτόχρονα. Τέλος, ψύχουμε τον εξωτερικό σωλήνα με ταυτόχρονη αποδέσμευση της εσωτερικής πίεσης, επομένως ο σωλήνας TFP παίρνει τις τελικές του διαστάσεις. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας κατασκευής παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1

Η κατασκευή του υπόψη σωλήνα αποτελεί μια ελπιδοφόρο δυνατότητα για μείωση του κόστους κατασκευής αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων (πετρελαίου, φυσικού αερίου) διότι απαιτεί μόνο ένα λεπτό στρώμα κράματος ανθεκτικό σε διάβρωση, ενώ η αντοχή του σωλήνα προσδίδεται με την επένδυση του από τον εξωτερικό χαλύβδινο σωλήνα.



Σχήμα 1.1 : Διαδικασία κατασκευής σωλήνα TFP

Για την τοποθέτηση των αγωγών σε μεγάλα βάθη χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι με πιο πρόσφατη την μέθοδο reel-pipe laying που απεικονίζεται στα σχήματα 1.2 και 1.3. Η μέθοδος reel-pipe laying ή απλά reeling βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε διαδικασίες πόντισης αγωγών λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ένα μεγάλο κύλινδρο πάνω στον οποίο είναι τυλιγμένος ο αγωγός. Κατά τη διάρκεια της πόντισης, ο αγωγός υπόκειται σε συνδυασμό κάμψης, εφελκυσμού και εξωτερικής υδροστατικής πίεσης.



Σχήμα 1.2 : Μέθοδος reel-pipe laying

Μια ελκυστική λοιπόν δυνατότητα είναι η υποθαλάσσια τοποθέτηση (πόντιση) αγωγών TFP με τη μέθοδο του «τυλίγματος» του αγωγού (reeling). Παρόλα

αυτά το «τύλιγμα» του TFP αγωγού δεν έχει ακόμα πιστοποιηθεί τεχνολογικά, διότι δεν είναι ακόμα αποδεδειγμένο ότι ο εσωτερικός σωλήνας, λόγω της λεπτότητάς του, δεν θα «κυρτωθεί» («ζαρώσει») από την πλευρά της θλίψης ή δεν θα «χαλαρώσει» από την πλευρά του εφελκυσμού λόγω της κάμψης κατά τη διάρκεια του τυλίγματος πάνω στον κύλινδρο.

Επίσης σημαντική είναι η απαίτηση για έλεγχο των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από την κατεργασία κατασκευής του αγωγού TFP, διότι είναι πιθανόν να έχουν επιρροή τόσο στην αστοχία του εσωτερικού αγωγού όσο και στην αντοχή του TFP σε εξωτερική πίεση.

Η μελέτη λοιπόν της κατεργασίας κατασκευής του αγωγού διπλού τοιχώματος (TFP), των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από την κατεργασία καθώς και της αντοχής του TFP σε εξωτερική πίεση, η οποία θα ασκηθεί στο τελικό στάδιο της πόντισης, αποτελούν βασικές περιοχές έρευνας ώστε να αναπτυχθεί και να πιστοποιηθεί τεχνολογικά αυτή η νέα δυνατότητα τοποθέτησης των αγωγών TFP με τη μέθοδο reeling.

Οι παραπάνω λοιπόν περιοχές έρευνας δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο για την παρούσα διπλωματική εργασία και είναι τα κύρια αντικείμενα της μελέτης μας.



Σχήμα 1.3 : Μέθοδος reel-pipe laying

1.2 Ανασκόπηση προηγούμενων εργασιών

Το αντικείμενο του «τυλίγματος» του αγωγού διπλού τοιχώματος (TFP) καθώς και της κατεργασίας κατασκευής του, μελετάται από τον Οκτώβριο του 2002 από το πανεπιστήμιο Delft University of Technology σε συνεργασία με κατασκευαστικές εταιρίες.

Οι Focke et al. (2004) ανέπτυξαν ένα διδιάστατο αναλυτικό μοντέλο και το σύγκριναν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) με σκοπό να ερευνήσουν τις παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από τη διαδικασία κατασκευής του TFP καθώς και τις παραμέτρους που τις επηρεάζουν. Το διδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων MARC. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι υπήρχε διαφορά στις παραμένουσες θλιπτικές τάσεις ανάμεσα στο αναλυτικό μοντέλο και στο μοντέλο FEM. Η σημαντικότερη αιτία για τις διαφορές αυτές είναι ο διαφορετικός σχεδιασμός του υλικού (δι-γραμμικά ελαστικό για το αναλυτικό μοντέλο και ελαστοπλαστικό για το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων). Επίσης μια ανάλυση ευαισθησίας σημαντικών παραμέτρων της κατεργασίας έδειξε ότι την υψηλότερη επίδραση στις παραμένουσες τάσεις έχουν οι μεταβολές στις διαστάσεις του αγωγού (ανοχές). Ακολουθούν η εσωτερική πίεση και η διαφορά θερμοκρασίας με τον συντελεστή θερμικής διαστολής και τέλος το μέτρο ελαστικότητας και η κράτυνση του υλικού.

Στη συνέχεια οι Focke et al. (2005) δημοσίευσαν την έρευνα τους από πειράματα που πραγματοποίησαν για την αντοχή του εσωτερικού δακτυλίου σε αξονική συμπίεση. Στόχος της έρευνας ήταν να αποδειχθεί η επιρροή του εξωτερικού σωλήνα στην αντίσταση έναντι αστοχίας του εσωτερικού σωλήνα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 3 διαφορετικές διατάξεις πειραμάτων αξονικής συμπίεσης. Στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκε η αστοχία του εσωτερικού σωλήνα (μόνου του) σε αξονική συμπίεση, στη δεύτερη περίπτωση η αστοχία του εσωτερικού σωλήνα ενώ περιβαλλόταν από τον εξωτερικό και τέλος εξετάστηκε η αστοχία σε αξονική συμπίεση του ενωμένου εσωτερικού και εξωτερικού σωλήνα (TFP).

Σε νεότερη δημοσίευσή τους οι Focke et al. (2006a) πραγματοποίησαν πειράματα για την προσομοίωση του «τυλίγματος» σωλήνων TFP. Η έρευνα έγινε σε απλούς αγωγούς (μονού τοιχώματος) μικρής κλίμακας (22 mm εξωτερική διάμετρος)

ώστε να αποκτηθεί η απαραίτητη εμπειρία για την πραγματοποίηση καμπτικών πειραμάτων πλήρους κλίμακας (κανονικών διαστάσεων).

Σε μια πρόσφατη δημοσίευση οι Focke et al. (2006b) ανέπτυξαν αναλυτικά και υπολογιστικά FEM μοντέλα ώστε να προσομοιώσουν τη διαδικασία κατασκευής του αγωγού TFP και να προβλέψουν τις παραμένουσες περιμετρικές τάσεις του εσωτερικού σωλήνα. Σε σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων των μοντέλων με τα αποτελέσματα του εργοστασίου αναδείχθηκε η αδυναμία της ακριβούς πρόβλεψης των παραμενουσών τάσεων από τα μοντέλα. Σ' αυτή την αδυναμία συμβάλλει η απουσία μετρήσεων της θερμοκρασίας του εσωτερικού σωλήνα κατά τη διάρκεια της επαφής του με τον θερμό εξωτερικό καθώς αποδείχθηκε ότι είναι μια σημαντική παράμετρος για την πρόβλεψη των παραμενουσών περιμετρικών τάσεων του εσωτερικού σωλήνα. Η μελέτη έδειξε επίσης ότι το όριο διαρροής, η κράτυνση του υλικού και ο συντελεστής θερμικής διαστολής του εσωτερικού σωλήνα επηρεάζουν σημαντικά τις παραμένουσες τάσεις.

Ανάπτυξη τριδιάστατου αναλυτικού και υπολογιστικού μοντέλου που θα λαμβάνει υπόψη και τις αξονικές παραμορφώσεις, με σκοπό την ακριβέστερη πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων, βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη.

1.3 Στόχος της εργασίας

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας κατασκευής του αγωγού διπλού τοιχώματος (TFP), η μελέτη των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από αυτή την κατεργασία, η επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας και ο υπολογισμός της αντοχής του αγωγού TFP σε εξωτερική πίεση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση του υπολογιστικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων "ABAQUS". Πρόκειται για ένα υπολογιστικό πρόγραμμα όπου σχεδιάζονται γραφικά τα μοντέλα στον προεπεξεργαστή "ABAQUS CAE" και με την επιβολή των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, των ιδιοτήτων των υλικών και την επιβολή των φορτίων γίνεται η αριθμητική προσομοίωση της ανωτέρω μελέτης με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η αναλυτική λύση της ευστάθειας των λεπτότοιχων ελαστικών δακτυλίων υπό εξωτερική πίεση, για την εύρεση της «κρίσιμης» πίεσης λυγισμού καθώς και της πίεσης πλήρους πλαστικοποίησης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η αναλυτική λύση στους δακτυλίους που αποτελούν τον TFP ώστε να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της μέγιστης πίεσης που μπορεί να παραλάβει ο κάθε δακτύλιος μέχρι την αστοχία.

Στο Κεφάλαιο 3 συγκρίνουμε την ανωτέρω αναλυτική λύση με την υπολογιστική λύση των πεπερασμένων στοιχείων. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται επίσης μια παραμετρική ανάλυση με το υπολογιστικό πρόγραμμα ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι που οδηγούν σε αποτελεσματικότερη αριθμητική προσομοίωση.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφουμε τη διαδικασία κατασκευής του σωλήνα TFP προσομοιάζοντας την κατάλληλα στο “ABAQUS”. Εξετάζονται οι παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την κατεργασία και μελετάται η επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας στη δημιουργία των τάσεων αυτών.

Στο Κεφάλαιο 5 επιβάλλουμε εξωτερική πίεση στον «κατασκευασμένο» πλέον αγωγό ώστε να προσδιορίσουμε την τιμή του κρίσιμου φορτίου για την αστοχία του αγωγού. Επίσης μελετάται η επίδραση των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας στην αντοχή του αγωγού.

Στο κεφάλαιο 6 μελετάμε την κατεργασία κατασκευής, τις παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν και την αντοχή ενός σωλήνα TFP μεγαλύτερου πάχους με σκοπό την εξαγωγή γενικότερων και ακριβέστερων συμπερασμάτων γύρω από τη διαδικασία κατασκευής του σωλήνα, τις παραμένουσες τάσεις, την αντοχή του σωλήνα σε εξωτερική πίεση και την επίδραση των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας.

Τέλος συνοψίζονται τα συμπεράσματα από την παρούσα διπλωματική εργασία και παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

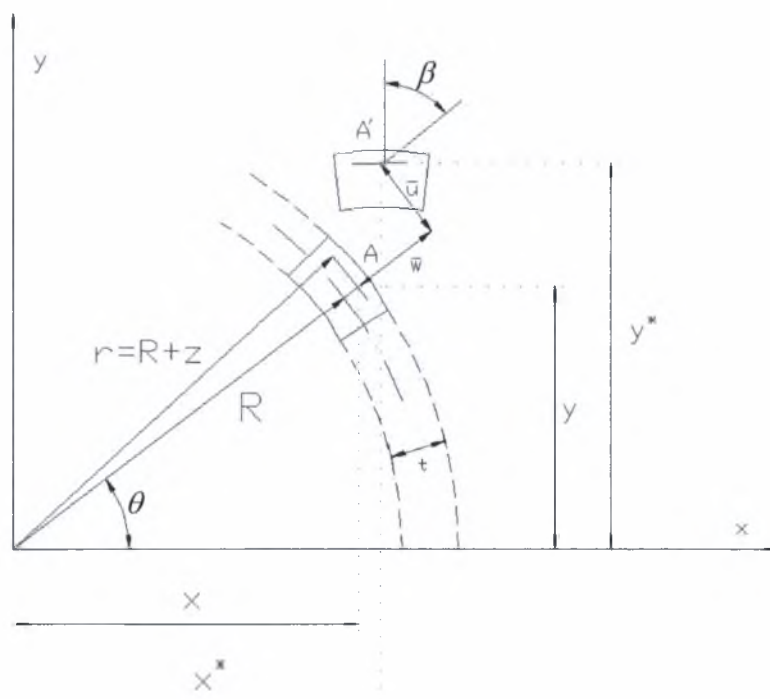
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΥΠΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βασική θεωρία ευστάθειας των δακτυλίων υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση με αναλυτικές μεθόδους. Στην συνέχεια εφαρμόζεται η αναλυτική λύση στους δακτυλίους που συνθέτουν τον αγωγό TFP.

2.1 Ευστάθεια λεπτότοιχων ελαστικών δακτυλίων

➤ Κινηματική δακτυλίου

Μελετάται δακτύλιος ο οποίος έχει μέση ακτίνα R και πάχος t . Εξετάζεται το σημείο A που απέχει απόσταση z από τη μέση περιφέρεια του δακτυλίου.



Σε πολικές συντεταγμένες οι μετατοπίσεις του σημείου A είναι :
 \bar{w} (ακτινική) και \bar{u} (εφαπτομενική).

x, y είναι οι συντεταγμένες του Α στην απαραμόρφωτη κατάσταση

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta \\ y &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (2.1)$$

x^*, y^* είναι οι συντεταγμένες του Α στην παραμορφωμένη κατάσταση

$$\begin{aligned} x^* &= (r + \bar{w}) \cos \theta - \bar{u} \sin \theta \\ y^* &= (r + \bar{w}) \sin \theta + \bar{u} \cos \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx^*}{d\theta} &= x^{*'} = -(r + \bar{w} + \bar{u}') \sin \theta - (\bar{u} - \bar{w}') \cos \theta \\ \frac{dy^*}{d\theta} &= y^{*'} = (r + \bar{w} + \bar{u}') \cos \theta - (\bar{u} - \bar{w}') \sin \theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

όπου $(\cdot)'$ σημαίνει $\frac{d(\cdot)}{d\theta}$

Επίσης

$$\begin{aligned} ds^2 &= dx^2 + dy^2 \Rightarrow \\ ds^2 &= r^2 d\theta^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

ενώ

$$\begin{aligned} ds^{*2} &= dx^{*2} + dy^{*2} \Rightarrow \\ ds^{*2} &= \left[r^2 + 2r(\bar{u}' + \bar{w}) + (\bar{u}' + \bar{w})^2 + (\bar{u} - \bar{w}')^2 \right] d\theta^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Η παραμόρφωση $\bar{\varepsilon}$ ορίζεται ως

$$\bar{\varepsilon} = \frac{ds^* - ds}{ds} \quad (2.6)$$

όπου $ds = r \cdot d\theta$

Οπότε λόγω της παραπάνω σχέσης

$$\bar{\varepsilon} + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{ds^*}{ds} \right)^2 - 1 \right] \quad (2.7)$$

Αν τώρα θεωρήσω ότι $\bar{\varepsilon} \approx 1$, τότε

$$\bar{\varepsilon} + \frac{1}{2}\bar{\varepsilon}^2 \approx \bar{\varepsilon} \quad (2.8)$$

Οπότε από (2.7) και (2.8) η παραμόρφωση $\bar{\varepsilon}$ γίνεται

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{ds^*}{ds} \right)^2 - 1 \right] \quad (2.9)$$

Τώρα η παραμόρφωση $\bar{\varepsilon}$ (σχέση 2.9) λόγω των (2.4), (2.5) παίρνει τη μορφή

$$\bar{\varepsilon} = \left(\frac{\bar{u}' + \bar{w}}{r} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{u} - \bar{w}'}{r} \right)^2 \quad (2.10)$$

Η συνολική στροφή είναι

$$\bar{\beta} = \frac{1}{r} (\bar{u} - \bar{w}') \quad (2.11)$$

και η συνολική αξονική παραμόρφωση

$$\bar{\varepsilon}_o = \frac{1}{r} (\bar{u}' + \bar{w}) \quad (2.12)$$

Επομένως η σχέση (2.10) λόγω των (2.11), (2.12) γίνεται

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_o + \frac{1}{2} \bar{\beta}^2 \quad (2.13)$$

Εφαρμόζοντας τις παραδοχές Bernoulli

$$\begin{aligned} \bar{u} &= u + z\beta \\ \bar{w} &= w \end{aligned} \quad (2.14)$$

η παραμόρφωση $\bar{\varepsilon}$ (σχέση 2.10) γίνεται :

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \left(\frac{u' + w}{r} \right) + \frac{1}{2} \beta^2 + z \left(\frac{\beta'}{r} \right) \Rightarrow \\ \bar{\varepsilon} &= \varepsilon_o + \frac{1}{2} \beta^2 + z \frac{\beta'}{r} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 + zk \quad (\text{βασική κινηματική σχέση}) \quad (2.15)$$

όπου $k = \frac{\beta'}{r}$ η καμπυλότητα

➤ Καταστατικός νόμος δακτυλίου

Θεωρώ γραμμικά ελαστικό υλικό. Οπότε ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.16)$$

αν έχω δακτύλιο σε επίδεση έντασης, ενώ

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon \quad (2.17)$$

αν έχω δακτύλιο σε επίδεση παραμόρφωση,

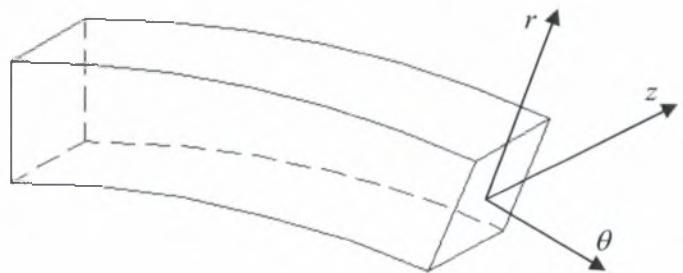
όπου E το μέτρο ελαστικότητας και ν ο αριθμός Poisson.

Σημειώνεται πως οι παραπάνω σχέσεις προκύπτουν από το νόμο του Hooke.

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu\sigma_\theta - \nu\sigma_r) \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu\sigma_z - \nu\sigma_r) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Θεωρώντας $\sigma_r = 0$, έχουμε

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu\sigma_\theta) \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu\sigma_z) \end{aligned} \quad (2.19)$$



• για επίπεδη ένταση $\sigma_z = 0$ άρα

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \sigma_\theta \quad \Rightarrow \quad \sigma_\theta = E\varepsilon_\theta \quad (2.20)$$

- για επίπεδη παραμόρφωση $\varepsilon_z = 0$, οπότε η (2.19) γίνεται

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \nu \sigma_\theta \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu^2 \sigma_\theta) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_\theta \quad (2.21)$$

Σε κάθε περίπτωση μπορώ να θεωρήσω πως έχουμε $\sigma = E^* \varepsilon$, με

$$E^* = \begin{cases} E & \text{για επίπεδη ένταση} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & \text{για επίπεδη παραμόρφωση} \end{cases}$$

Από εδώ και στο εξής θα γράφω E με την προϋπόθεση πως αν έχω επίπεδη παραμόρφωση το E γίνεται $\frac{E}{1-\nu^2}$, ενώ για επίπεδη ένταση ισχύει ο τύπος ως έχει.

➤ Δυναμική ενέργεια δακτυλίου (ανά μονάδα μήκους)

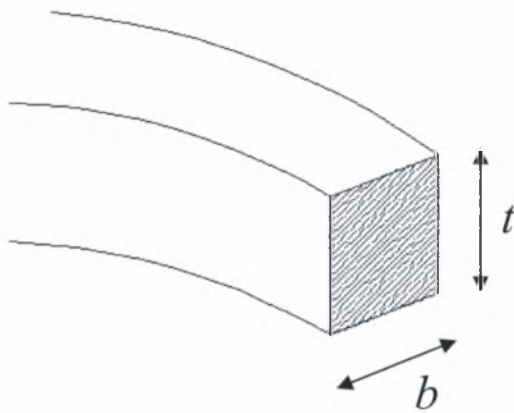
Χρησιμοποιώ την ενεργειακή θεώρηση, χρησιμοποιώντας την αρχή της στάσιμης τιμής της δυναμικής ενέργειας. Η συνολική ενέργεια δίνεται από τον τύπο

$$\Pi = U + V \quad (2.22)$$

όπου U η ενέργεια παραμόρφωσης και V η μεταβολή δυναμικού.

➤ Ενέργεια παραμόρφωσης U

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \int_V \sigma \cdot \varepsilon \, dV = \frac{1}{2} \iiint \sigma (\varepsilon_0 + kz) \, dA \, ds \Rightarrow \\ U &= \frac{EAR}{2} \int_0^{2\pi} \varepsilon_0^2 d\theta + \frac{EIR}{2} \int_0^{2\pi} k^2 d\theta \end{aligned} \quad (2.23)$$



όπου

$$A = b \cdot t$$

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\bar{u}' + \bar{w}}{R} + \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{u} - \bar{w}'}{R} \right)^2$$

$$k = \frac{\bar{u}' - \bar{w}''}{R^2}$$

➤ Μεταβολή δυναμικού φορτίων

Εξ ορισμού ισχύει :

$$V = -W \quad (2.24)$$

όπου W είναι το έργο των δυνάμεων.

Στην προκειμένη περίπτωση το φορτίο είναι ομοιόμορφη πίεση σε κλειστό δακτύλιο, οπότε το δυναμικό ισούται με το γινόμενο της πίεσης επί την περικλειόμενη επιφάνεια.

Επομένως

$$V = -p \cdot \Delta A = -p(A - A^*) \quad (2.25)$$

όπου A το εμβαδόν του απαραμόρφωτου δακτυλίου και A* το εμβαδόν του παραμορφωμένου δακτυλίου, δηλαδή

$$A = \pi R^2 \quad (2.26)$$

ενώ

$$A^* = \int_{A^*} dA^* = \frac{1}{2} \int_{A^*} \left(\frac{\partial x^*}{\partial x^*} + \frac{\partial y^*}{\partial y^*} \right) dA^*$$

όπου μετά από πράξεις παίρνουμε

$$A^* = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (2Rw + u^2 - uw' + u'w + w^2) d\theta + \pi R^2 \quad (2.27)$$

Άρα η μεταβολή του εμβαδού ΔA λόγω των (2.26) & (2.27) γίνεται

$$\Delta A = A - A^* = -\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (2Rw + u^2 - uw' + u'w + w^2) d\theta \quad (2.28)$$

Οπότε το δυναμικό (2.25) λόγω της (2.28) γίνεται

$$V = -p \cdot \Delta A = p \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (2Rw + u^2 - uw' + u'w + w^2) d\theta \quad (2.29)$$

Επομένως η συνολική δυναμική ενέργεια (2.22) λόγω των σχέσεων (2.23) και (2.29) γίνεται :

$$\Pi = U + V \Rightarrow \Pi = R \left\{ \frac{EA\varepsilon_0^2}{2} + \frac{EI k^2}{2} + p \left[w + \frac{1}{2R} (u^2 - uw' + u'w + w^2) \right] \right\} \quad (2.30)$$

Βρίσκω τώρα τη μεταβολή $\delta\Pi$ της συνολικής δυναμικής ενέργειας

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= R \int_0^{2\pi} EA\varepsilon_0 \delta\varepsilon_0 d\theta + R \int_0^{2\pi} EI k \delta k d\theta \\ &+ pR \int_0^{2\pi} \left\{ \delta w + \frac{1}{2R} (2u\delta u - u\delta w' - w'\delta u + u'\delta w + w\delta u' + 2w\delta w) \right\} d\theta \end{aligned} \quad (2.31)$$

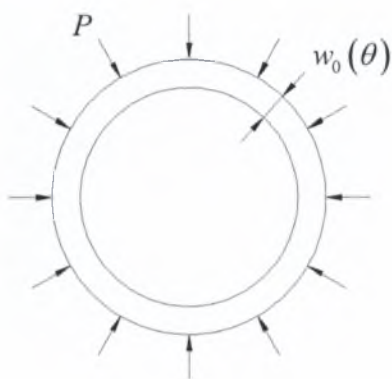
Απαιτώ το Π να έχει στάσιμη τιμή, δηλαδή $\delta\Pi=0$, οπότε μετά από πράξεις καταλήγω σε 2 διαφορικές εξισώσεις ως προς u και w , τις 2 εξισώσεις ισορροπίας του δακτυλίου :

$$\begin{aligned} &\left[\left(\frac{u' + w}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{u - w'}{R} \right)^2 \right]' + \frac{I}{AR^2} \left(\frac{u - w'}{R} \right)'' \\ &\quad - \left[\left(\frac{u' + w}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{u - w'}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{u - w'}{R} \right) - \frac{pR}{EA} \left(\frac{u - w'}{R} \right) = 0 \\ &\frac{I}{AR^2} \left(\frac{u - w'}{R} \right)''' - \left[\left(\frac{u' + w}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{u - w'}{R} \right)^2 \right] \\ &\quad - \left[\left[\left(\frac{u' + w}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{u - w'}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{u - w'}{R} \right) \right]' - \frac{pR}{EA} \left(\frac{u' + w}{R} \right) = \frac{pR}{EA} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Στη συνέχεια, αφού προσδιορίσω την προλυγισμική λύση, οι εξισώσεις αυτές θα “γραμμικοποιηθούν” ώστε να πάρω τις τελικές εξισώσεις ευστάθειας του δακτυλίου.

➤ Προλυγισμική λύση

Θεωρώ ομοιόμορφη “συρρίκνωση” του δακτυλίου, λόγω επιβολής της ομοιόμορφης εξωτερικής πίεσης.



$$N_0 = -pR \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_0^0 = \frac{w_0}{R} \quad (2.34)$$

$$w_0(\theta) = w_0 = \sigma \tau \alpha \theta. \quad (2.35)$$

Επίσης

$$N_0 = EA\varepsilon_0^0 = EA \frac{w_0}{R} \quad (2.36)$$

Άρα λόγω (2.33) και (2.36)

$$w_0 = -\frac{pR^2}{EA} \quad (2.37)$$

ενώ

$$u_0 = 0 \quad (2.38)$$

Η παραπάνω λύση ικανοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας, ενώ από φυσικής πλευράς αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη “συρρίκνωση” του δακτυλίου.

> Ανάλυση ευστάθειας

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία διαταραχής έχω

$$\begin{aligned} w &\rightarrow w_0 + w_1, & w_0 &= -\frac{pR^2}{EA} \\ u &\rightarrow u_0 + u_1, & u_0 &= 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

όπου w_1, u_1 είναι μικρές μετατοπίσεις.

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις (2.39) στις εξισώσεις ισορροπίας (2.32) και διατηρώντας μέχρι γραμμικούς όρους ως προς w_1, u_1 , έχουμε τις παρακάτω τελικές εξισώσεις ως προς w_1, u_1

$$\begin{aligned} EAR^2 (u_1' + w_1)' + EI (u_1 - w_1)'' &= 0 \\ EAR^2 (u_1' + w_1) + EI (u_1 - w_1)''' + pR^3 (w_1'' + u_1) &= 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τις γραμμικοποιημένες εξισώσεις της ευστάθειας του δακτυλίου.

> Λύση των εξισώσεων ευστάθειας

Θεωρώ περιοδικές συναρτήσεις για τα w_1, u_1

Έστω

$$\begin{aligned} u_1 &= c_1 \sin n\theta \\ w_1 &= c_2 \cos n\theta, & n &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (2.41)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω λύση (2.41) στις γραμμικοποιημένες εξισώσεις (2.40) έχουμε :

$$\begin{aligned} \left[EAR^2 (-n^2 c_1 - n c_2) + EI (-n^2 c_1 - n^3 c_2) \right] \sin n\theta &= 0 \\ \left[EI (-n^3 c_1 - n^4 c_2) + EAR^2 (n c_1 + c_2) - pR^3 (c_2 - n^2 c_2) \right] \cos n\theta &= 0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

ή ισοδύναμα

$$\begin{aligned} \left[n^2 \left(1 + \frac{I}{AR^2} \right) c_1 + n \left(1 + \frac{n^2 I}{AR^2} \right) c_2 \right] \sin n\theta &= 0 \\ \left\{ \left(\frac{I}{AR^2} n^3 + n \right) c_1 + \left[\left(\frac{I}{AR^2} n^4 + 1 \right) - (n^2 - 1) \frac{pR}{EA} \right] c_2 \right\} \cos n\theta &= 0 \end{aligned} \quad (2.43)$$

Θέτοντας

$$\alpha = \frac{I}{AR^2} \quad (2.44)$$

$$\gamma = \frac{pR}{EA} \quad (2.45)$$

Έχουμε

$$\begin{pmatrix} n^2(1+\alpha) & n(1+\alpha n^2) \\ n(1+\alpha n^2) & (1+\alpha n^4) - (n^2-1)\gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (2.46)$$

Για να έχω μη τετριμμένη λύση θα πρέπει $c_1, c_2 \neq 0$ και $\det[\cdot] = 0$

• Περίπτωση 1

Εξετάζουμε την περίπτωση για $n=1$

$$\begin{aligned} u_{1(1)} &= c_1 \sin \theta \\ w_{1(1)} &= c_2 \cos \theta \end{aligned} \quad (2.47)$$

από την (2.46) η ιδιομορφή είναι

$$\begin{aligned} (1+\alpha)(c_1 + c_2) &= 0 \Rightarrow \\ c_1 &= -c_2 \end{aligned} \quad (2.48)$$

Επομένως, λόγω της (2.48) οι σχέσεις (2.47) γίνονται

$$\begin{aligned} u_{1(1)} &= -c_1 \sin \theta \\ w_{1(1)} &= c_1 \cos \theta \end{aligned} \quad (2.49)$$

Η ανωτέρω λύση είναι κίνηση στερεού σώματος. Αξιωνουμε όμως ότι ο δακτύλιος είναι κατάλληλα δεσμευμένος έναντι κίνησης στερεού σώματος. Επομένως η λύση δεν μας ενδιαφέρει, οπότε ενδιαφερόμαστε για μορφές με $n \geq 2$.

• Περίπτωση 2

Εξετάζουμε την περίπτωση για $n \geq 2$.

Ο μηδενισμός της ορίζουσας (2.46) μας δίνει τις τιμές του p για τις οποίες τα c_1, c_2 ενδέχεται να έχουν μη-μηδενικές λύσεις.

$$p = p_n = \frac{n^2 - 1}{1 + a} \frac{EI}{R^3} \quad (2.50)$$

Η μικρότερη τιμή των παραπάνω φορτίων είναι για $n=2$.

Συγκεκριμένα η σχέση (2.50) για $n=2$ γίνεται:

$$p_{cr} = p_2 = \frac{3}{1 + a} \frac{EI}{R^3} = \frac{E}{4(1 + a)} \left(\frac{t}{R} \right)^3 = \frac{2E}{1 + a} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (2.51)$$

Η αντίστοιχη ιδιομορφή από την (2.46) είναι

$$4(1 + a)c_1 + 2(1 + 4a)c_2 = 0 \Rightarrow$$

$$c_2 = -2 \left(\frac{1 + a}{1 + 4a} \right) c_1 \quad (2.52)$$

Μια απλούστευση των παραπάνω εξισώσεων είναι δυνατή όταν $1 + a \ll 1$

$$a = \frac{I}{AR^2} = \frac{t^3/12}{tR^2} = \frac{1}{12} \left(\frac{t}{R} \right)^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (2.53)$$

Αν $\frac{D}{t} \geq 30$ τότε

$$a \leq \frac{1}{3} \frac{1}{30^2} = 3.7 \times 10^{-4} \quad (2.54)$$

Επομένως μπορώ να αγνοήσω το a στις ανωτέρω σχέσεις (2.51) & (2.52).

Έτσι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι :

$$P_{cr} = 2E \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (2.55)$$

$$c_2 = -2c_1 \quad (2.56)$$

και επομένως

$$\begin{aligned} u_{l(2)} &= -\frac{A}{2} \sin 2\theta \\ w_{l(2)} &= A \cos 2\theta \end{aligned} \quad (2.57)$$

Στην περίπτωση που έχω επίπεδη παραμόρφωση το E πρέπει να γίνει $\frac{E}{1-\nu^2}$.

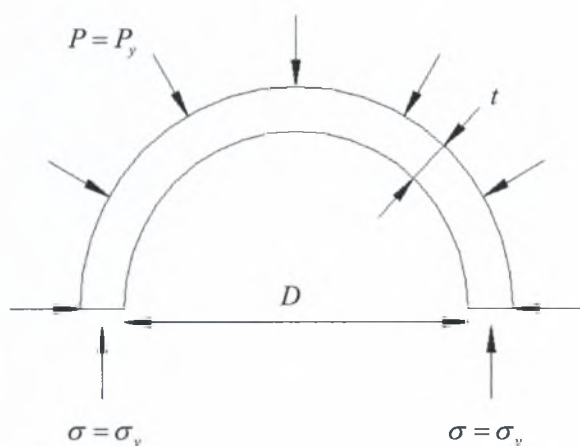
Συνεπώς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για επίπεδη παραμόρφωση (δηλαδή μακρύ σωλήνα με ομοιόμορφη συμπεριφορά της κάθε διατομής) γίνεται :

$$P_{cr} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (2.58)$$

Η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι το κρίσιμο φορτίο ελαστικού λυγισμού υπό εξωτερική πίεση εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας E και από τη γεωμετρία.

Συγκεκριμένα εξαρτάται από το λόγο $\frac{t}{D}$ και όχι από το D ή το t σε απόλυτο μέγεθος, όπου t είναι το πάχος και D η διάμετρος του δακτυλίου.

Στη συνέχεια, πραγματοποιώντας μια πλαστική ανάλυση του δακτυλίου,



η τιμή της εξωτερικής πίεσης που απαιτείται για πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής δίνεται από τον τύπο :

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D}, \quad (2.59)$$

όπου σ_y είναι το όριο διαρροής για δι-γραμμικό υλικό.

Για να ισχύει λοιπόν η ως άνω ελαστική θεωρία θα πρέπει,

$$\begin{aligned} P_{cr} &\leq P_y \\ \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^3 &\leq 2\sigma_y \frac{t}{D} \\ \frac{D}{t} &\geq \sqrt{\frac{E}{\sigma_y(1-\nu^2)}} \end{aligned} \quad (2.60)$$

Η ανωτέρω σχέση δείχνει πως εάν ο σωλήνας είναι σχετικά παχύς δεν θα έχουμε το φαινόμενο του λυγισμού στην ελαστική περιοχή. Στην περίπτωση αυτή, σε κάποια τιμή της πίεσης, η τάση στο δακτύλιο θα φτάσει το όριο διαρροής και ο δακτύλιος θα πλαστικοποιηθεί.

➤ Κριτήριο Von Mises

$$\sigma_z^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_z \sigma_\theta = \sigma_y^2 \quad (2.61)$$

Λόγω της σχέσης $\sigma_z = \nu \sigma_\theta$ η οποία ισχύει για επίπεδη παραμόρφωση, η παραπάνω σχέση (2.61) γίνεται :

$$\begin{aligned} \nu^2 \sigma_\theta^2 + \sigma_\theta^2 - \nu \sigma_\theta^2 &= \sigma_y^2 \Rightarrow \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_y}{\sqrt{1+\nu^2-\nu}} \end{aligned} \quad (2.62)$$

η οποία για λόγο Poisson $\nu = 0.3$ γίνεται

$$\sigma_{\theta} = 1.13 \times \sigma_y \quad (2.63)$$

Οπότε σύμφωνα με τις σχέσεις (2.59) και (2.63), για κριτήριο διαρροής “Von Mises”, το φορτίο που απαιτείται για αστοχία λόγω πλαστικοποίησης είναι

$$P_y = 2 \times 1.13 \times \sigma_y \frac{t}{D} \quad (2.64)$$

2.2 Ανάλυση ευστάθειας στους δακτυλίους

Εφαρμόζουμε τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης ευστάθειας των λεπτότοιχων δακτυλίων σε 2 δακτυλίους (“εξωτερικό” & “εσωτερικό”) οι οποίοι θα συνθέσουν τον σωλήνα TFP (Tight Fit Pipe) τον οποίο και θα μελετήσουμε σε επόμενα κεφάλαια.

Θεωρούμε το πρόβλημα διδιάστατο και με εντατική κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης.

2.2.1 Περιγραφή δακτυλίων

Όταν αναφερόμαστε σε διάμετρο ή ακτίνα οι συμβολισμοί D, R και d, r δηλώνουν εξωτερικό και εσωτερικό δακτύλιο αντίστοιχα, ενώ οι δείκτες $[\cdot]_o, [\cdot]_m, [\cdot]_i$ δηλώνουν αντίστοιχα την εξωτερική, μεσαία και εσωτερική διάμετρο.

Στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά ο δείκτης $[\cdot]_o$ αναφέρεται στον εξωτερικό δακτύλιο (outer pipe), ενώ ο δείκτης $[\cdot]_i$ στον εσωτερικό (liner pipe).

Τα χαρακτηριστικά των δακτυλίων παρουσιάζονται παρακάτω.

> Εξωτερικός δακτύλιος

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o = 325mm$
- Πάχος δακτυλίου : $t_o = 14.3mm$
- Λόγος διαμέτρου προς πάχος : $\frac{D_o}{t_o} = \frac{325}{14.3} = 22.73$
- Τάση διαρροής : $\sigma_{y,o} = 566 \frac{N}{mm^2}$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E_o = 208000MPa$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$

➤ **Εσωτερικός δακτύλιος**

- Εξωτερική διάμετρος : $d_o = 296mm$
- Πάχος δακτυλίου : $t_l = 3mm$
- Λόγος διαμέτρου προς πάχος : $\frac{d_o}{t_l} = \frac{296}{3} = 98.67$
- Τάση διαρροής : $\sigma_{y,l} = 298 \frac{N}{mm^2}$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E_l = 200000MPa$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$

$$\text{Σημειώνεται πως : } 1 \frac{N}{mm^2} = 1 \frac{N}{(10^{-3}m)^2} = 10^6 \frac{N}{m^2} = 10^6 Pa = 1MPa$$

Από εδώ και στο εξής, για τις τάσεις θα χρησιμοποιούνται οι μονάδες MPa.

Επίσης όπου αναφέρονται διαστάσεις οι μονάδες είναι χιλιοστά (mm).

2.2.2 Υπολογισμός κρίσιμων φορτίων

➤ **Φορτίο λυγισμού**

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε προηγουμένως, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για επίπεδη παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση (2.58). Στη συνέχεια υπολογίζεται το φορτίο λυγισμού για τους 2 δακτυλίους.

➤ **Εξωτερικός δακτύλιος**

$$P_{cr} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t_o}{D_m} \right)^3 = \frac{2 \times 208000}{1-0.09} \left(\frac{14.3}{310.7} \right)^3 = 44.57MPa$$

➤ **Εσωτερικός δακτύλιος**

$$P_{cr} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t_l}{d_m} \right)^3 = \frac{2 \times 200000}{1-0.09} \left(\frac{3}{293} \right)^3 = 0.472MPa$$

➤ **Φορτίο πλαστικοποίησης**

Η πίεση που απαιτείται για πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής δίνεται από τον τύπο (2.64). Παρακάτω υπολογίζεται το φορτίο πλαστικοποίησης για τους 2 δακτυλίους.

➤ **Εξωτερικός δακτύλιος**

$$P_y = 2 \times 1.13 \times \sigma_{y,o} \frac{t_o}{D_m} = 2 \times 1.13 \times 566 \times \frac{14.3}{310.7} = 58.87 \text{ MPa}$$

➤ **Εσωτερικός δακτύλιος**

$$P_y = 2 \times 1.13 \times \sigma_{y,i} \frac{t_i}{d_m} = 2 \times 1.13 \times 298 \times \frac{3}{293} = 6.896 \text{ MPa}$$

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται τα κρίσιμα φορτία για τους 2 δακτυλίους.

	Εξωτερικός δακτύλιος	Εσωτερικός δακτύλιος
Φορτίο λυγισμού	$P_{cr} = 44.57 \text{ MPa}$	$P_{cr} = 0.472 \text{ MPa}$
Φορτίο πλαστικοποίησης	$P_y = 58.87 \text{ MPa}$	$P_y = 6.896 \text{ MPa}$

Πίνακας 2.1 Κρίσιμα φορτία δακτυλίων

Παρατηρείται ότι τόσο για τον εξωτερικό όσο και για τον εσωτερικό δακτύλιο $P_{cr} \leq P_y$, οπότε έχουμε ελαστική συμπεριφορά στους δακτυλίους. Άρα η πιο «επικίνδυνη» περίπτωση αστοχίας είναι αυτή του λυγισμού.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία με σκοπό τη σύγκριση των υπολογιστικών τιμών με τις αναλυτικές λύσεις που υπολογίστηκαν σ' αυτό το κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΑΠΛΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΥΠΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται χωριστά οι σωλήνες που συνθέτουν τον αγωγό διπλού τοιχώματος, τον οποίο θα μελετήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο. Η αστοχία ενός σωλήνα υπό την επίδραση εξωτερικής πίεσης μπορεί να θεωρηθεί διδιάστατο πρόβλημα, υποθέτοντας ότι το κυλινδρικό κέλυφος έχει άπειρο μήκος και ότι το φορτίο και η παραμόρφωση δεν μεταβάλλονται κατά το μήκος.

Εξετάζεται λοιπόν η αντοχή των δακτυλίων υπό την επίδραση εξωτερικής πίεσης με πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης. Επίσης πραγματοποιείται σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με των αντίστοιχων αναλυτικών που προέκυψαν από την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου. Η προεπεξεργασία των μοντέλων γίνεται εξ' ολοκλήρου στο module CAE του ABAQUS.

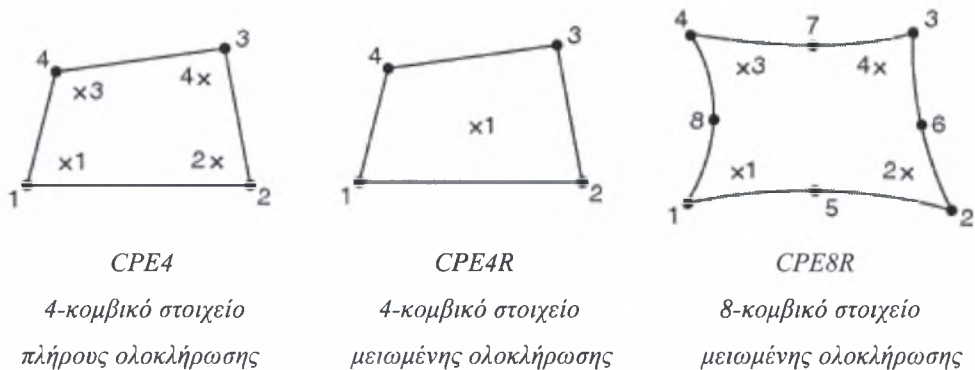
3.1 Περιγραφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

3.1.1 Τύπος στοιχείου

Για να πραγματοποιήσουμε την καλύτερη και πιο αποτελεσματική προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε διάφορους τύπους πεπερασμένων στοιχείων από την βιβλιοθήκη του ABAQUS. Οι σωλήνες προσομοιώθηκαν με διδιάστατα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης για δύο τύπους ολοκλήρωσης, πλήρους και μειωμένης :

- CPE4 (4-κομβικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης – 2X2 ολοκλήρωση)
- CPE4R (4-κομβικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης – 1X1 ολοκλήρωση)
- CPE8R (8-κομβικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης – 2X2 ολοκλήρωση)

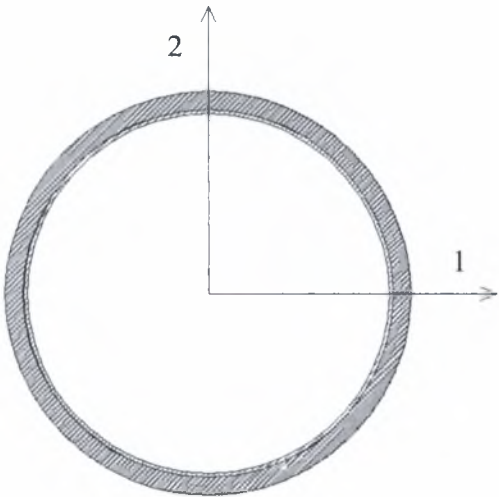
με 46 ομοιόμορφα κατανομημένα στοιχεία κατά την περιφέρεια και 4 κατά το πάχος για τον εξωτερικό σωλήνα και 46 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος για τον εσωτερικό σωλήνα.



Σχήμα 3.1 : Στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης CPE4, CPE4R και CPE8R

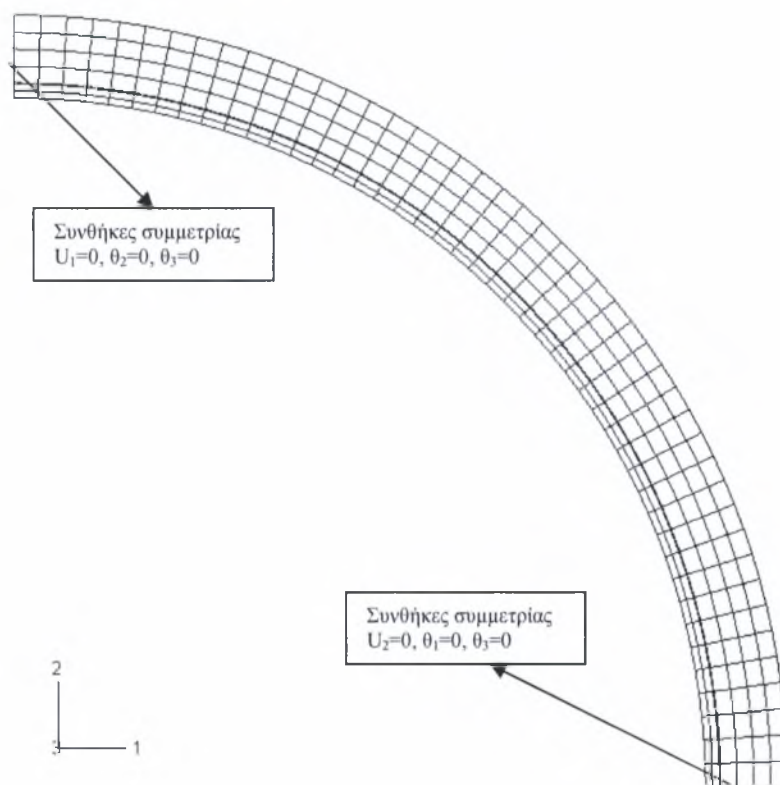
3.1.2 Συνοριακές συνθήκες

Κατά την προσομοίωση αναλύθηκε μόνο το ¼ του δακτυλίου, εφόσον το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τους άξονες 1 και 2 όπως φαίνεται στο σχ. 3.1.



Σχήμα 3.2 : Δακτύλιος

Στα άκρα επιβάλλαμε κατάλληλες οριακές συνθήκες συμμετρίας, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες συμβιβαστού για τις μετατοπίσεις και τις στροφές. Συγκεκριμένα στο κάτω δεξί άκρο έχουμε συμμετρία κατά το επίπεδο 1-3 (δηλαδή δέσμευση της μετατόπισης στον άξονα 2 και των στροφών γύρω από τους άξονες 1 και 3), ενώ στο άνω αριστερό άκρο συμμετρία κατά το επίπεδο 2-3 (δηλαδή δέσμευση της μετατόπισης στον άξονα 1 και των στροφών γύρω από τους άξονες 2 και 3). Οι συμμετρίες αυτές προσδιορίστηκαν με τις επιλογές YSYMM ($U_2=U_3=U_1=0$) και XSYMM ($U_1=U_2=U_3=0$) αντίστοιχα.

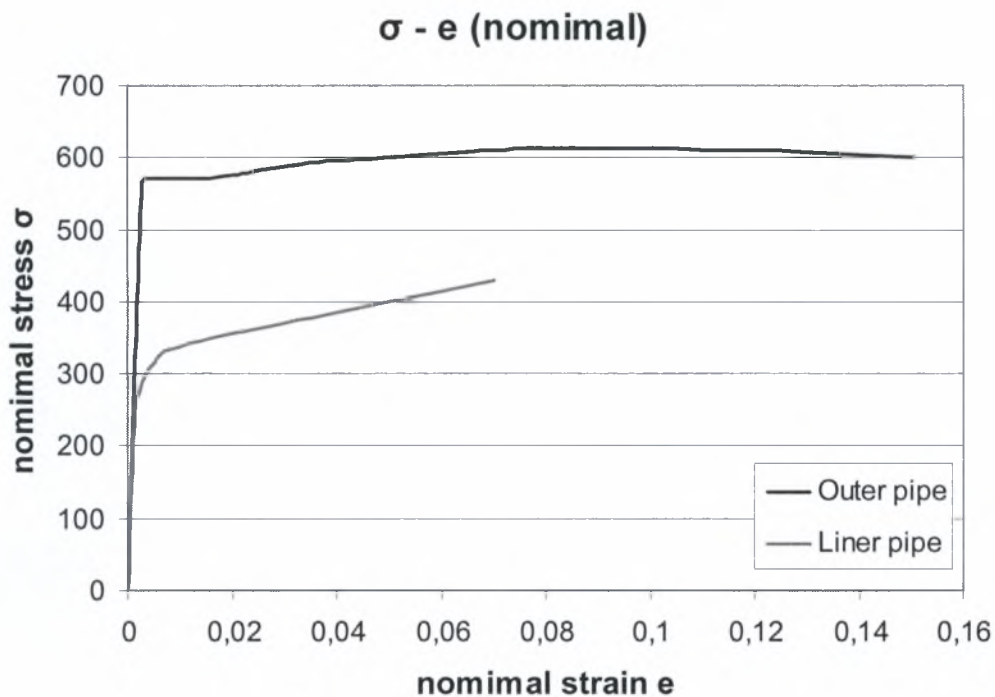


Σχήμα 3.3 : Τμήματα δακτυλίων που προσομοιώθηκαν

Οι σωλήνες που εξετάζουμε υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις κατά την κατάρρευση με αποτέλεσμα να δημιουργούνται γεωμετρικές μη-γραμμικότητες. Η θεώρηση αυτή έγινε στο ABAQUS με την ενεργοποίηση της υποεντολής “**nlgeom**” μέσα στην εντολή “**step**” που ορίζει τα βήματα με τα οποία θα προχωρήσει η μη-γραμμική ανάλυση. Η “**nlgeom**” λοιπόν λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της γεωμετρίας κατά την ανάλυση, κάτι που σημαίνει ότι το φορτίο (στη συγκεκριμένη περίπτωση η εξωτερική πίεση) θα είναι σε κάθε στιγμή κάθετο στην επιφάνεια.

3.1.3 Ιδιότητες υλικού

Οι σωλήνες που αναλύονται υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις γι' αυτό πρέπει η συμπεριφορά του υλικού να προσομοιωθεί ανάλογα, ώστε να λαμβάνονται υπόψη μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Στο παρακάτω διάγραμμα (σχ. 3.4) παρουσιάζονται οι καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης των υλικών των 2 δακτυλίων.



Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα ονομαστικής τάσης - ονομαστικής παραμόρφωσης

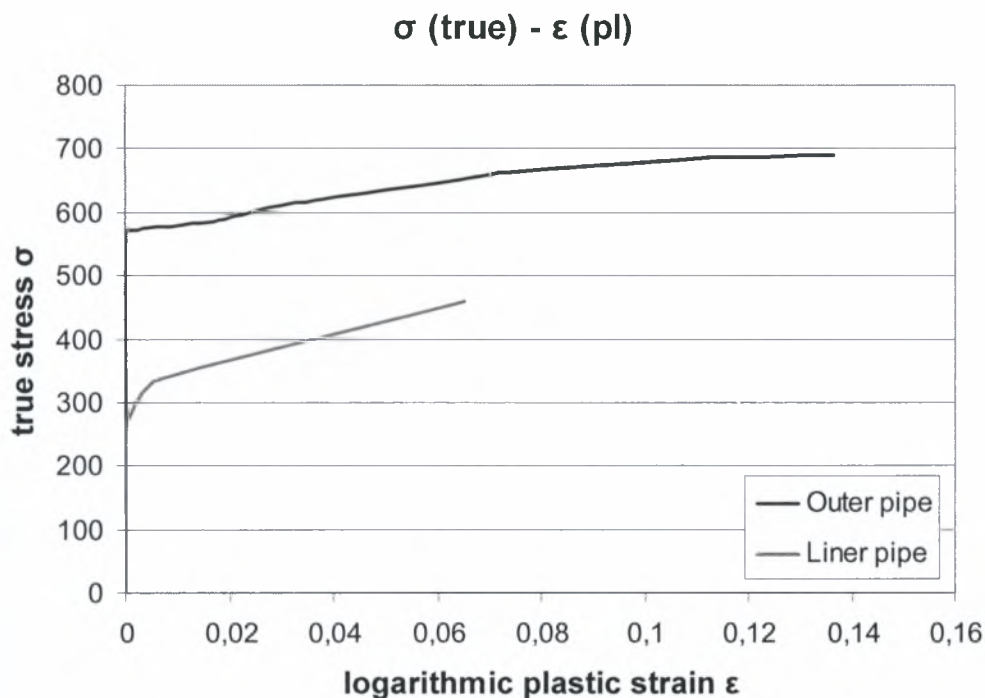
Από το παραπάνω διάγραμμα λαμβάνουμε ένα επαρκή αριθμό ζευγών τιμών (σ_{nom}, e) . Στο ABAQUS χρησιμοποιούμε τιμές της καμπύλης ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης, αφού πρώτα τις τροποποιήσουμε ως τιμές πραγματικής τάσης – λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης σύμφωνα με τους τύπους :

$$\sigma_T = \sigma_{nom}(1 + e) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + e) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (3.2)$$

όπου σ είναι η τάση και οι δείκτες $[.]_{nom}$ και $[.]_T$ δηλώνουν ονομαστική τάση και πραγματική τάση αντίστοιχα, ενώ e είναι η ονομαστική παραμόρφωση και ε_{ln}^p η λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι τροποποιημένες, σύμφωνα με τους τύπους (3.1) και (3.2), τιμές πραγματικής τάσης – λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 3.5 : Καμπύλη πραγματικής τάσης - λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης

3.2 Αριθμητική προσομοίωση δακτυλίων

Τα χαρακτηριστικά των 2 δακτυλίων τα οποία παρουσιάσαμε αρχικά στην παράγραφο 2.2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

	Εξωτερικός δακτύλιος	Εσωτερικός δακτύλιος
Εξωτερική διάμετρος	$D_o = 325mm$	$d_o = 296mm$
Πάχος δακτυλίου	$t_o = 14.3mm$	$t_l = 3mm$
Λόγος διαμέτρου προς πάχος	$\frac{D_o}{t_o} = \frac{325}{14.3} = 22.73$	$\frac{d_o}{t_l} = \frac{296}{3} = 98.67$
Τάση διαρροής	$\sigma_{y,o} = 566 \frac{N}{mm^2}$	$\sigma_y = 298 \frac{N}{mm^2}$
Μέτρο ελαστικότητας	$E_o = 208000MPa$	$E = 200000MPa$
Λόγος Poisson	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.3$

Πίνακας 3.1 : Χαρακτηριστικά στοιχεία δακτυλίων

Επίσης υπενθυμίζουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευστάθειας που πραγματοποιήσαμε στο 2^ο κεφάλαιο.

	Εξωτερικός δακτύλιος	Εσωτερικός δακτύλιος
Φορτίο λυγισμού	$P_{cr} = 44.57MPa$	$P_{cr} = 0.472MPa$
Φορτίο πλαστικοποίησης	$P_y = 58.87MPa$	$P_y = 6.896MPa$

Πίνακας 3.2 : Κρίσιμα φορτία δακτυλίων

3.2.1 Ανάλυση ιδιοτιμών για τον υπολογισμό της κρίσιμης ελαστικής πίεσης

Προσομοιώσαμε αρχικά ένα μοντέλο δακτυλίου χωρίς αρχική ατέλεια με σκοπό να κάνουμε έλεγχο ιδιοτιμών με την εντολή “Buckle”. Χρησιμοποιήσαμε τα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης CPE4, CPE4R και CPE8R. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης μας δίνουν την κρίσιμη πίεση ελαστικού λυγισμού και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Τύπος στοιχείου	Εξωτερικός δακτύλιος	Εσωτερικός δακτύλιος
CPE4	$P_{\max} = 44.7MPa$	$P_{\max} = 0.784MPa$
CPE4R	$P_{\max} = 41.62MPa$	$P_{\max} = 0.356MPa$
CPE8R	$P_{\max} = 44.304MPa$	$P_{\max} = 0.472MPa$

Πίνακας 3.3 : Ανάλυση ιδιοτιμών δακτυλίων

3.2.2 Δακτύλιος με μικρή ατέλεια

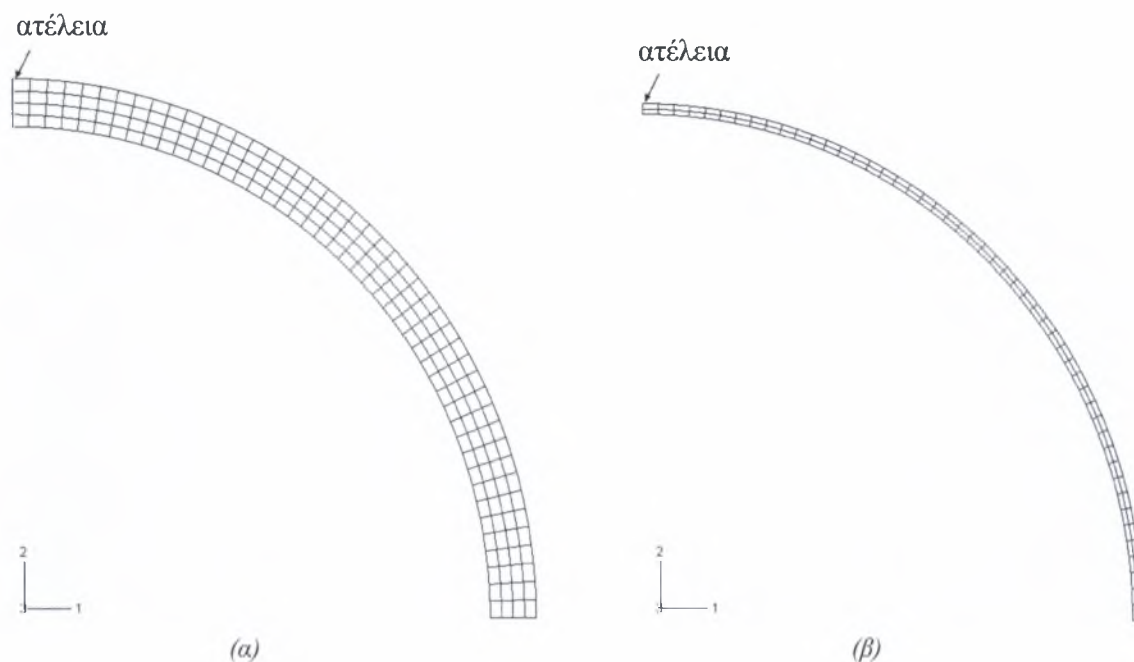
Σε μια πραγματική κατασκευή το υλικό και η γεωμετρία δεν είναι ποτέ τέλεια, οπότε είναι σίγουρο ότι ο δρόμος ισορροπίας θα ακολουθήσει τον μεταλυσμικό δρόμο ισορροπίας.

Έτσι λοιπόν, προτού εφαρμόσουμε την πίεση επιβάλλουμε μια πολύ μικρή ατέλεια στον δακτύλιο ώστε η πίεση να ακολουθήσει τον μεταλυσμικό δρόμο ισορροπίας και το μοντέλο να οδηγηθεί στην τυπική μορφή κατάρρευσης των δακτυλίων (flattening). Πιο συγκεκριμένα η τοπική ατέλεια η οποία δημιουργήσαμε ώστε να προσδιορίσουμε το οριακό φορτίο είναι μια μικρή μετατόπιση των κόμβων

στο άνω αριστερό άκρο του δακτυλίου μεγέθους $s = \frac{R_{\epsilon\xi} - R_{\tau\epsilon\lambda}}{R_{\epsilon\xi} - R_{\epsilon\sigma}} = \frac{162.5 - 162.2}{14.3} = 2\%$

για τον εξωτερικό δακτύλιο και $s = \frac{R_{\epsilon\xi} - R_{\tau\epsilon\lambda}}{R_{\epsilon\xi} - R_{\epsilon\sigma}} = \frac{148 - 147.85}{3} = 5\%$ για τον εσωτερικό

δακτύλιο.



Σχήμα 3.6 : Περιοχή δημιουργίας ατέλειας (α) εξωτερικού & (β) εσωτερικού δακτυλίου

Με αυτή τη μετατόπιση το πάχος του σωλήνα στη συγκεκριμένη περιοχή θα είναι λίγο μικρότερο από τα υπόλοιπα σημεία, με αποτέλεσμα η τάση να είναι λίγο μεγαλύτερη. Έτσι ο σωλήνας θα έχει μια «προδιάθεση» για αστοχία και τελικά μόλις η τιμή της πίεσης φθάσει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού ο σωλήνας θα αστοχήσει και θα επέλθει κατάρρευση.

Επειδή η συμπεριφορά του μοντέλου μετά την πρώτη αστοχία και κατά την κατάρρευση είναι ένα γεωμετρικά μη γραμμικό πρόβλημα με ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά, για την επιβολή της πίεσης χρησιμοποιείται η μέθοδος μήκος τόξου κατά Riks με την εντολή “**Static Riks**”, ενώ υποχρεώνουμε την ανάλυση να προχωρήσει με μικρά βήματα, μέσω των παραμέτρων της εντολής **Static**, για την σωστή εκτίμηση της κρίσιμης πίεσης. Η μέθοδος Riks θα παρουσιαστεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

3.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Εφαρμόζοντας λοιπόν πίεση στον δακτύλιο με τη μέθοδο Riks παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

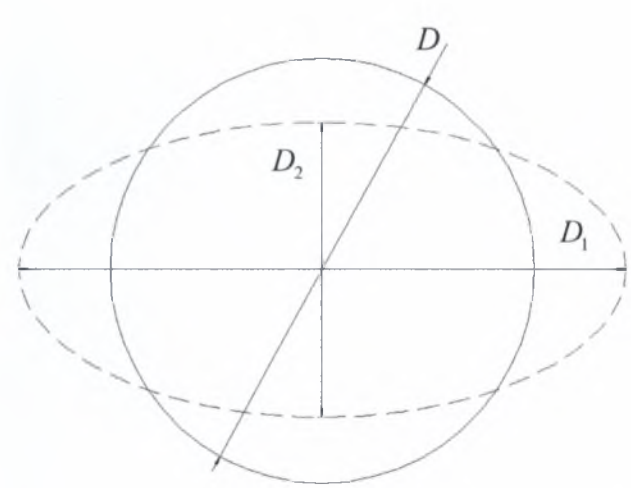
Τύπος στοιχείου	Εξωτερικός δακτύλιος	Εσωτερικός δακτύλιος
CPE4	$P_{\max} = 44.55MPa$	$P_{\max} = 0.784MPa$
CPE4R	$P_{\max} = 43.12MPa$	$P_{\max} = 0.356MPa$
CPE8R	$P_{\max} = 44.08MPa$	$P_{\max} = 0.471MPa$

Πίνακας 3.4 : Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούμε την μεταβλητή Ovalization J η οποία ορίζεται ως εξής :

$$J = \frac{|D_1 - D_2|}{2D}, \tag{3.3}$$

όπου D η ονομαστική διάμετρος του απαραμόρφωτου δακτυλίου, D_1 η οριζόντια διάμετρος και D_2 η κάθετη διάμετρος του παραμορφωμένου δακτυλίου.



$$\begin{aligned}
 D_1 &= D + 2w(0) \\
 D_2 &= D + 2w\left(\frac{\pi}{2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

όπου

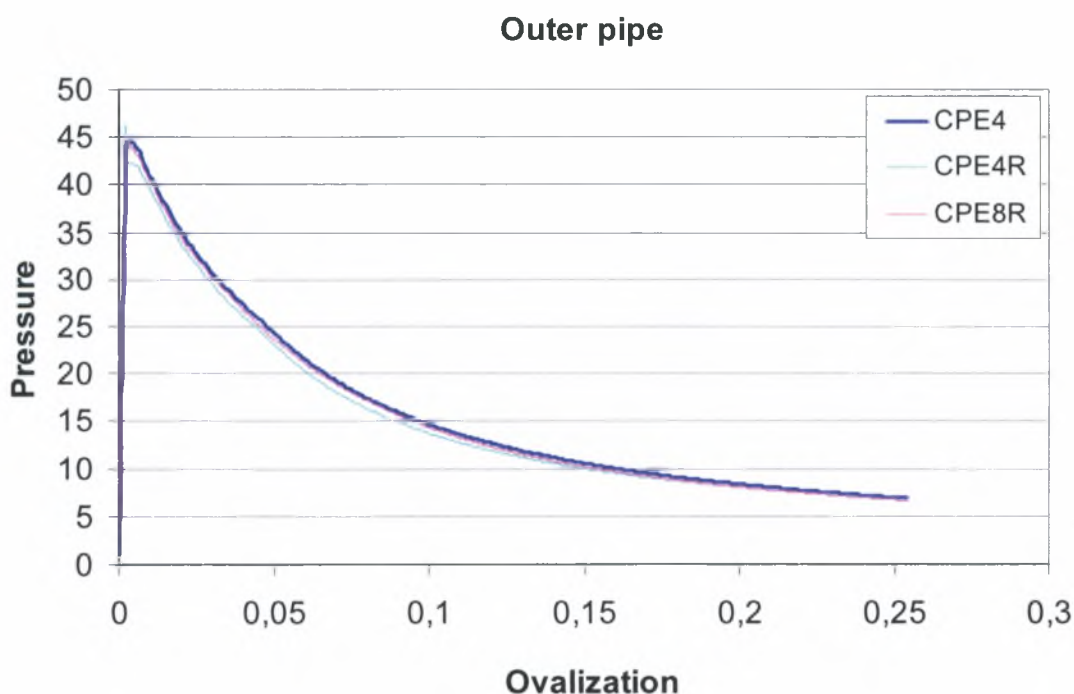
$$w(\theta) = a \cdot \cos 2\theta \tag{3.5}$$

η μετατόπιση των σημείων του κύκλου συναρτήσει της γωνίας θ

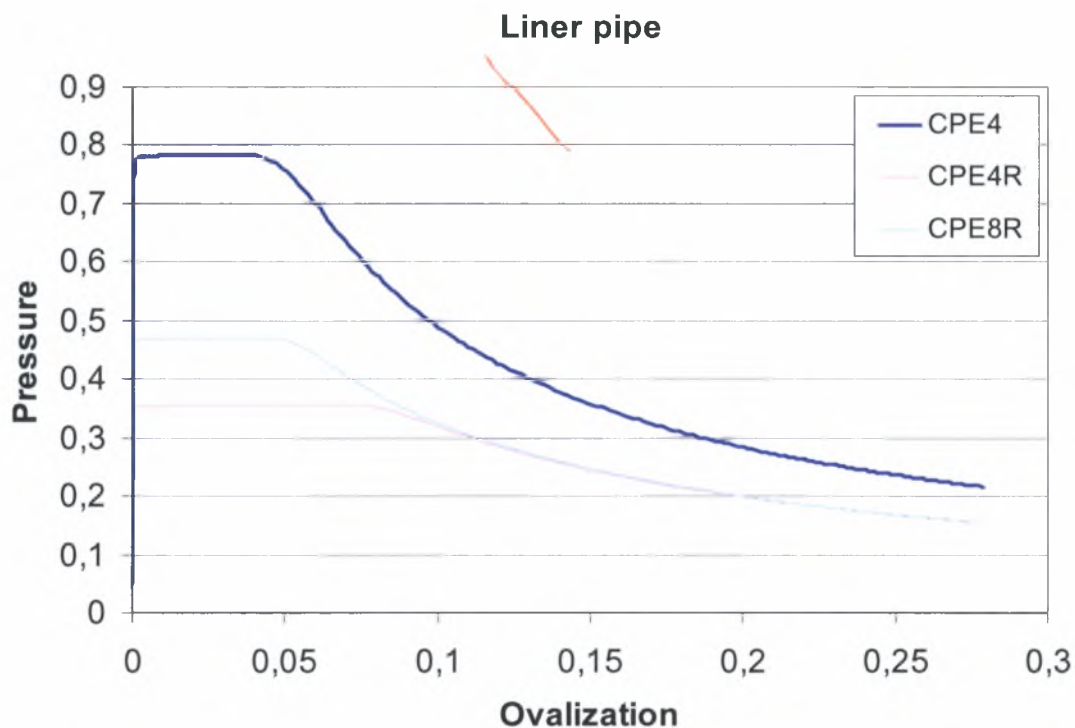
Οπότε η σχέση του Ovalization (3.3) γίνεται :

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{|D_1 - D_2|}{2D} = \frac{\left| \cancel{D} + 2w(0) - \cancel{D} - 2w\left(\frac{\pi}{2}\right) \right|}{2D} = \frac{\left| 2w(0) - 2w\left(\frac{\pi}{2}\right) \right|}{2D} \Rightarrow \\
 J &= \frac{\left| w(0) - w\left(\frac{\pi}{2}\right) \right|}{D}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η εξωτερική πίεση που επιβάλλεται στον εξωτερικό και εσωτερικό δακτύλιο συναρτήσει της μεταβλητής Ovalization.



Σχήμα 3.7 (α) : Διάγραμμα εξωτερικής πίεσης συναρτήσει του Ovalization για τον εξωτερικό δακτύλιο



Σχήμα 3.7 (β) : Διάγραμμα εξωτερικής πίεσης συναρτήσει του Ovalization για τον εσωτερικό δακτύλιο

Από τα παραπάνω αποτελέσματα για τους 2 δακτυλίους και για 3 διαφορετικά στοιχεία βλέπουμε ότι το στοιχείο CPE8R προσεγγίζει ακριβέστερα την αναλυτική λύση. Γι' αυτό το λόγο υιοθετούμε το στοιχείο CPE8R για την περαιτέρω μελέτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.

Σ' αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του αγωγού TFP (Tight Fit Pipe) και προσομοιώνεται στον προεπεξεργαστή "ABAQUS CAE". Στη συνέχεια υπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται από αυτή την κατεργασία και ακολούθως μελετάται η επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας στην τελική εντατική κατάσταση του σωλήνα.

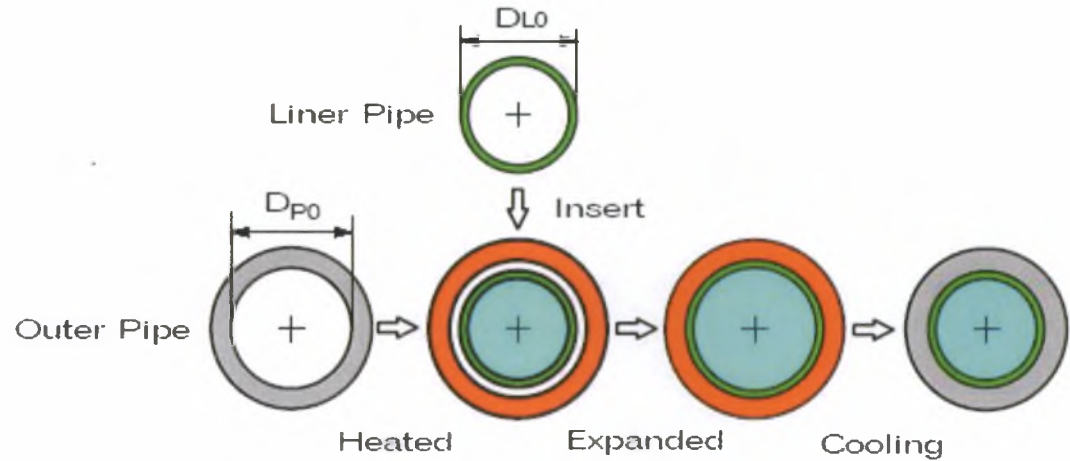
4.1 Γενική περιγραφή

4.1.1 Διαδικασία κατασκευής σωλήνα TFP

Η διαδικασία κατασκευής (Σχήμα 4.1) του σωλήνα TFP χωρίζεται σε 3 βήματα. Στο 1^ο βήμα ο εξωτερικός σωλήνας (outer pipe) θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία όπου δεν φθείρει τις μηχανικές του ιδιότητες (όριο διαρροής, μέτρο ελαστικότητας). Ο σωλήνας λοιπόν σ' αυτό το βήμα διαστέλλεται χωρίς περιορισμούς, οπότε δεν αναπτύσσονται περιμετρικές τάσεις.

Στο 2^ο βήμα, και ενώ ο εξωτερικός διατηρείται σε υψηλή θερμοκρασία, εισέρχεται ο εσωτερικός σωλήνας (liner pipe) ο οποίος διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_0 = 20^{\circ}C$. Στη συνέχεια του επιβάλλουμε εσωτερική πίεση, πέραν της πίεσης πλήρους πλαστικοποίησης, με αποτέλεσμα να διασταλεί κι έτσι οι 2 σωλήνες έρχονται σε επαφή. Συνεχίζοντας να επιβάλλουμε πίεση μεγαλύτερη από την πίεση που απαιτείται για να υπάρξει επαφή, οι 2 σωλήνες συνεχίζουν να διαστέλλονται ταυτόχρονα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πλαστικοποίηση τους και τη δημιουργία παραμενουσών τάσεων που επηρεάζουν την μετέπειτα συμπεριφορά του αγωγού.

Στο 3^ο και τελευταίο βήμα ψύχεται ο εξωτερικός σωλήνας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με ταυτόχρονη αποδέσμευση της εσωτερικής πίεσης, με αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του σύνθετου σωλήνα. Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας προκύπτουν θλιπτικές περιμετρικές τάσεις στον εσωτερικό δακτύλιο και εφελκυστικές περιμετρικές τάσεις στον εξωτερικό δακτύλιο στο τέλος της κατεργασίας.



Σχήμα 4.1 : Διαδικασία κατασκευής σωλήνα TFP

4.1.2 Περιγραφή δακτυλίων

Τα χαρακτηριστικά των δακτυλίων που συνθέτουν τον αγωγό TFP παρουσιάζονται παρακάτω.

	Εξωτερικός δακτύλιος	Εσωτερικός δακτύλιος
Εξωτερική διάμετρος	$D_o = 325mm$	$d_o = 296mm$
Πάχος δακτυλίου	$t_o = 14.3mm$	$t_i = 3mm$
Λόγος διαμέτρου προς πάχος	$\frac{D_o}{t_o} = \frac{325}{14.3} = 22.73$	$\frac{d_o}{t_i} = \frac{296}{3} = 98.67$
Τάση διαρροής	$\sigma_{y,o} = 566 \frac{N}{mm^2}$	$\sigma_y = 298 \frac{N}{mm^2}$
Μέτρο ελαστικότητας	$E_o = 208000MPa$	$E = 200000MPa$
Λόγος Poisson	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.3$
Συντελεστής θερμικής διαστολής	$a_o = 1.16 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}C$	$a_i = 1.40 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}C$

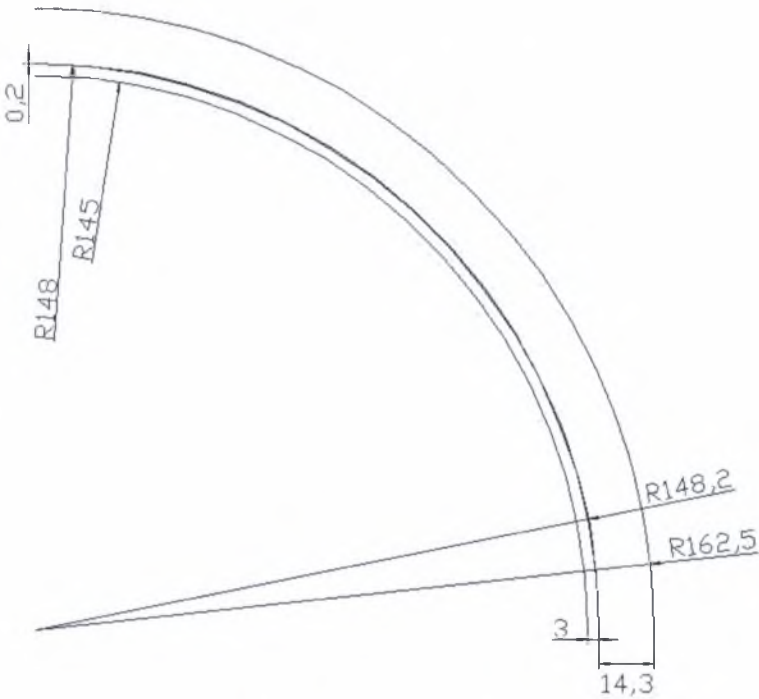
Πίνακας 4.1 : Χαρακτηριστικά στοιχεία δακτυλίων

Τα υλικά των 2 δακτυλίων προσδιορίζονται από την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης (Σχήμα 3.4) που παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.1.3

Παρακάτω παρουσιάζουμε συνοπτικά τα στοιχεία των διαστάσεων των 2 δακτυλίων που θα μας βοηθήσουν στην ανάλυση που θα ακολουθήσει.

	Εξωτερικός δακτύλιος		Εσωτερικός δακτύλιος	
	Διάμετρος	Ακτίνα	Διάμετρος	Ακτίνα
Εξωτερική	$D_o = 325mm$	$R_o = 162.5mm$	$d_o = 296mm$	$r_o = 148mm$
Μεσαία	$D_m = 310.7mm$	$R_m = 155.35mm$	$d_m = 293mm$	$r_m = 146.5mm$
Εσωτερική	$D_i = 296.4mm$	$R_i = 148.2mm$	$d_i = 290mm$	$r_i = 145mm$

Πίνακας 4.2 : Στοιχεία διαστάσεων δακτυλίων



Σχήμα 4.2 : Διαστάσεις αγωγού TFP

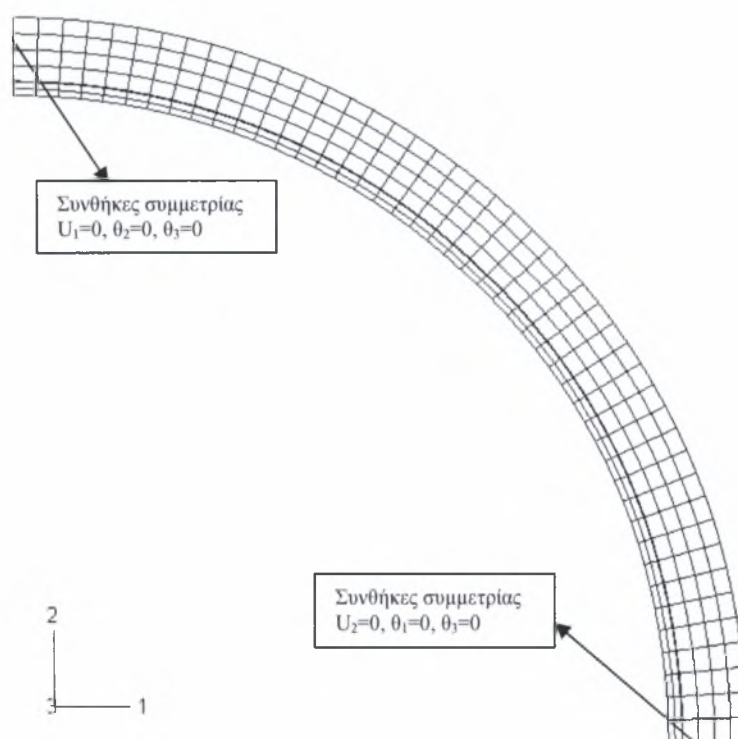
Παρατηρούμε ότι το αρχικό κενό μεταξύ των δακτυλίων είναι: $g_0 = R_i - r_o = 0.2mm$

4.2 Αριθμητική προσομοίωση κατεργασίας

4.2.1 Περιγραφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Η κατεργασία κατασκευής του σωλήνα TFP όπως περιγράφηκε παραπάνω, προσομοιώθηκε στο ABAQUS με πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης CPE8R τα οποία είναι οκτακομβικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (2X2). Λόγω συμμετριών προσομοιώσαμε μόνο το $\frac{1}{4}$ του σωλήνα. Δημιουργήσαμε πλέγμα με 46 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 4 κατά το πάχος για τον εξωτερικό σωλήνα και 46 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος για τον εσωτερικό σωλήνα.

Στα άκρα επιβάλλαμε κατάλληλες οριακές συνθήκες συμμετρίας, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες συμβιβαστού για τις μετατοπίσεις και τις στροφές. Συγκεκριμένα στο κάτω δεξί άκρο έχουμε συμμετρία κατά το επίπεδο 1-3 (δηλαδή δέσμευση της μετατόπισης στον άξονα 2 και των στροφών γύρω από τους άξονες 1 και 3), ενώ στο άνω αριστερό άκρο συμμετρία κατά το επίπεδο 2-3 (δέσμευση της μετατόπισης στον άξονα 1 και των στροφών γύρω από τους άξονες 2 και 3). Οι συμμετρίες αυτές προσδιορίστηκαν με τις επιλογές YSYMM ($U_2=U_1=U_3=0$) και XSYMM ($U_1=U_2=U_3=0$) αντίστοιχα.



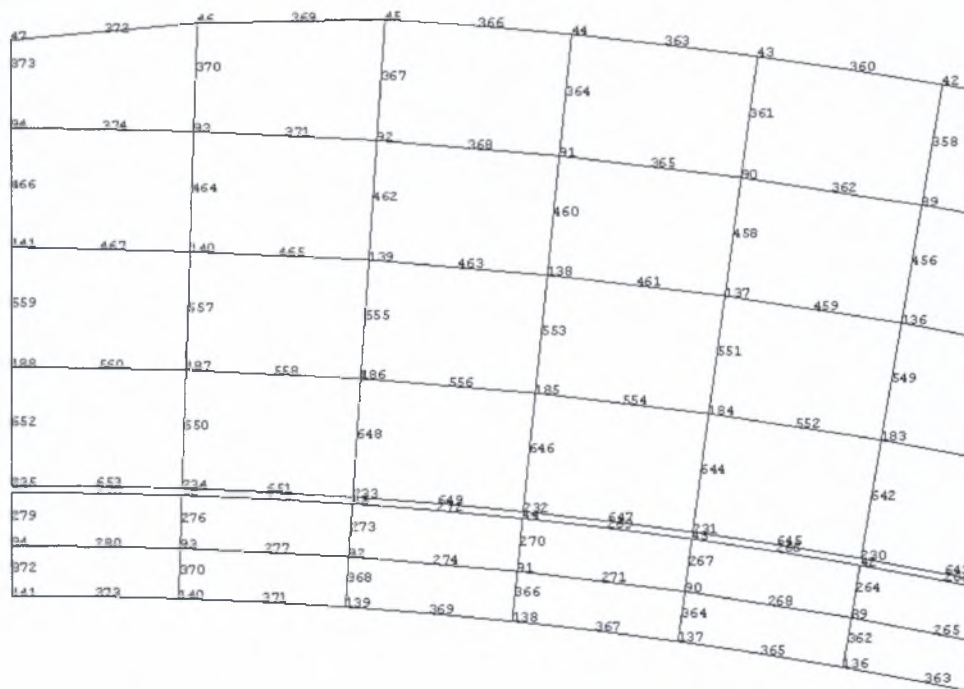
Σχήμα 4.3 : Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το σωλήνα TFP

Η αλληλεπίδραση των επιφανειών των δακτυλίων θεωρήθηκε χωρίς τριβή και προσομοιώθηκε με τις εντολές ***Contact Pair** και ***Surface Interaction**.

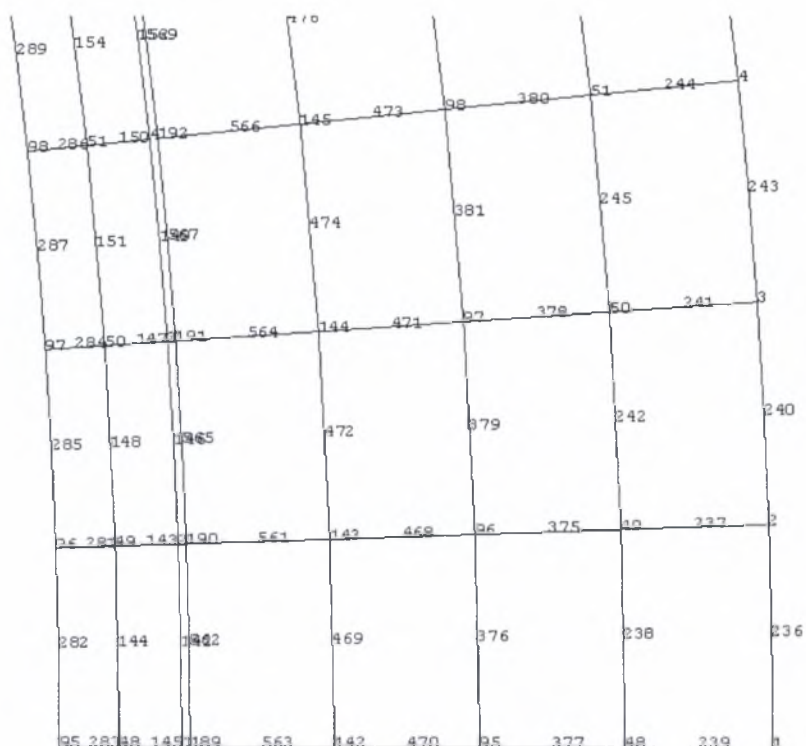
Όσον αφορά την προσομοίωση που έγινε στον προεπεξεργαστή, δημιουργήσαμε ένα πρώτο βήμα (step 1) στο οποίο επιβάλαμε διαφορά θερμοκρασίας στον εξωτερικό δακτύλιο με την παραδοχή ότι δεν φθείρονται οι ιδιότητες του υλικού. Στη συνέχεια (step 2) διατηρώντας την θερμοκρασιακή διαφορά επιβάλλαμε στον εσωτερικό δακτύλιο εσωτερική πίεση. Στο 3^ο και τελευταίο βήμα (step 3) αποδεσμεύουμε την εσωτερική πίεση και επαναφέρουμε την θερμοκρασία του εξωτερικού δακτυλίου στην αρχική της τιμή, ώστε οι 2 δακτύλιοι να έχουν ίδια θερμοκρασία. Κάνουμε την παραδοχή ότι δεν έχουμε μεταφορά θερμότητας από τον εξωτερικό δακτύλιο στον εσωτερικό.

Για την επιβολή της πίεσης χρησιμοποιείται η μέθοδος Riks. Η μέθοδος απαιτεί το μοντέλο να έχει μια αρχική ατέλεια. Δημιουργήσαμε λοιπόν μια μικρή ατέλεια στον δακτύλιο ώστε ο δρόμος ισορροπίας να ακολουθήσει το μεταλυσισμικό δρόμο ισορροπίας. Πιο συγκεκριμένα η τοπική ατέλεια η οποία δημιουργήσαμε (Σχήμα 4.4) είναι στο άνω αριστερό άκρο του εξωτερικού δακτυλίου και είναι μεγέθους

$$s = \frac{R_o - R_{ar}}{R_o - R_i} = \frac{R_o - R_{ar}}{t_o} = \frac{162.5 - 161.5}{14.3} = 7\%$$



Σχήμα 4.4 : Αρχική ατέλεια, άνω αριστερή διατομή ($\theta = \pi/2$)



Σχήμα 4.5 : Κάτω δεξιά διατομή ($\theta=0$)

Οι κόμβοι που κυρίως μας ενδιαφέρουν παρουσιάζονται παρακάτω.

Εξωτερικός δακτύλιος		
Κόμβος	Συντεταγμένες	
	x	y
47	0.	161.5
141	0.	155.3095
235	0.	148.2
1	162.5	0.
95	155.31	0.
189	148.2	0.

Εσωτερικός δακτύλιος		
Κόμβος	Συντεταγμένες	
	x	y
47	0.	148.
94	0.	146.4715
141	0.	145.
1	148.	0.
48	146.4715	0.
95	145.	0.

Πίνακας 4.3 : Συντεταγμένες «χαρακτηριστικών» κόμβων

Θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά του αγωγού σε κάθε στάδιο της κατεργασίας για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = 225 - 20 = 205K$ και εσωτερική πίεση $P_{int} = 40MPa$.

4.2.2 Θερμική διαστολή εξωτερικού σωλήνα

Η διαδικασία κατασκευής του σύνθετου σωλήνα απαιτεί όπως προαναφέραμε, την θέρμανση του εξωτερικού σωλήνα (βήμα 1) από θερμοκρασία $T_0 = 20^\circ\text{C}$ σε θερμοκρασία T . Η αρχική θερμοκρασία δίνεται στο αρχικό βήμα (initial step) μέσω της εντολής ***Initial Conditions, type=TEMPERATURE**. Η θερμοκρασία T με την οποία θερμαίνουμε το σωλήνα δίνεται στο βήμα 1 με την εντολή ***Temperature**.

Για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων σ' αυτό το στάδιο της κατεργασίας καθώς και για την επαλήθευσή τους χρησιμοποιούμε, εκτός από το υπολογιστικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, την αναλυτική λύση.

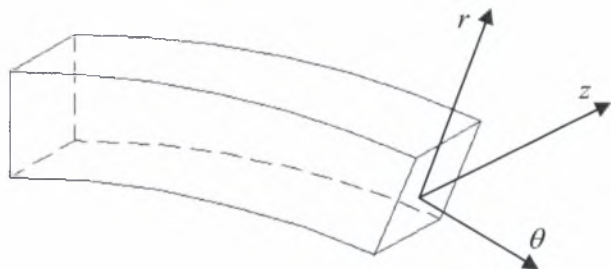
4.2.2.1 Αναλυτική λύση

Η αναλυτική λύση της θερμικής διαστολής προσεγγίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις οι οποίες ισχύουν για υλικό που έχει ελαστική συμπεριφορά. Έτσι λοιπόν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που προκύπτουν από την επιβολή θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT σε δακτύλιο με υλικό που έχει μέτρο ελαστικότητας E και συντελεστή θερμικής διαστολής α είναι :

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \alpha \cdot \Delta T \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] + \alpha \cdot \Delta T \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \alpha \cdot \Delta T\end{aligned}\quad (4.1)$$

Όμως για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης $\sigma_r, \sigma_\theta, \varepsilon_z = 0$

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\cancel{\sigma_r} - \nu(\cancel{\sigma_\theta} + \sigma_z)] + \alpha \cdot \Delta T \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\cancel{\sigma_\theta} - \nu(\sigma_z + \cancel{\sigma_r})] + \alpha \cdot \Delta T \\ \cancel{\sigma_z} &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\cancel{\sigma_r} + \cancel{\sigma_\theta})] + \alpha \cdot \Delta T\end{aligned}\quad (4.2)$$



επομένως

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= -\frac{1}{E} \nu \sigma_z + a \cdot \Delta T \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{1}{E} \nu \sigma_z + a \cdot \Delta T \\ 0 &= \frac{1}{E} \sigma_z + a \cdot \Delta T\end{aligned}\tag{4.3}$$

Χρησιμοποιώντας την 3^η από τις ανωτέρω εξισώσεις, έχω

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= -\frac{1}{E} \nu (-E \cdot a \cdot \Delta T) + a \cdot \Delta T \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{1}{E} \nu (-E \cdot a \cdot \Delta T) + a \cdot \Delta T \\ \sigma_z &= -E \cdot a \cdot \Delta T\end{aligned}\tag{4.4}$$

Δηλαδή

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= a \cdot \Delta T (1 + \nu) \\ \varepsilon_\theta &= a \cdot \Delta T (1 + \nu) \\ \sigma_z &= -E \cdot a \cdot \Delta T\end{aligned}\tag{4.5}$$

Η μετατόπιση Δr δίνεται από τον τύπο :

$$\left. \begin{aligned}\varepsilon_r &= a \cdot \Delta T (1 + \nu) \\ \varepsilon_r &= \frac{\Delta r}{r}\end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Delta r = a \cdot \Delta T (1 + \nu) \cdot r\tag{4.6}$$

Η μετατόπιση Δr του κόμβου 95 του εξωτερικού δακτυλίου από την μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta T = 225 - 20 = 205K$ υπολογίζεται από την εξίσωση (4.6) και είναι :

$$\Delta r = a_0 \cdot \Delta T (1 + \nu) r = 1.16 \times 10^{-5} \times (225 - 20) \times (1 + 0.3) \times 155.31 \Rightarrow$$

$$\Delta r = 0.4801 \text{ mm}$$

4.2.2.2 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η μετατόπιση u στον άξονα 1 του κόμβου 95 λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς $\Delta T = 205^\circ \text{C}$ είναι :

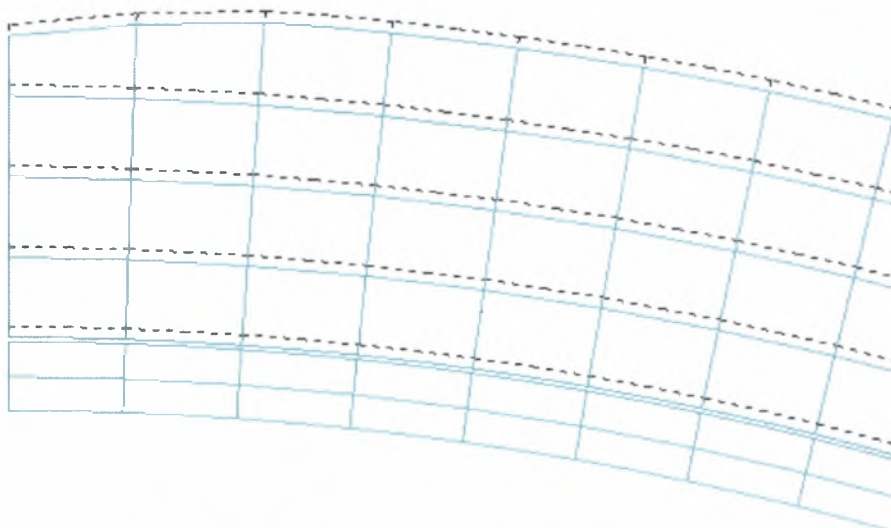
$$u_{1,0}^{95} = 0.4809 \text{ mm}$$

όπου ο πρώτος δείκτης $[\cdot]_1$ δηλώνει την κατεύθυνση (1 ή 2), ενώ ο δεύτερος δείκτης $[\cdot]_0$ δηλώνει εξωτερικό ή $[\cdot]_i$ εσωτερικό δακτύλιο.

Όπως βλέπουμε υπάρχει πολύ καλή συμφωνία ανάμεσα σε αναλυτική λύση ($\Delta r = 0.4801 \text{ mm}$) και υπολογιστική λύση ($u_{1,0}^{95} = 0.4809 \text{ mm}$).

Το κενό μεταξύ των 2 δακτυλίων που προκύπτει από τη θέρμανση του εξωτερικού δακτυλίου είναι :

$$g = g_0 + u_{1,0}^{189} = 0.2 + 0.4589 = 0.6589 \text{ mm}$$

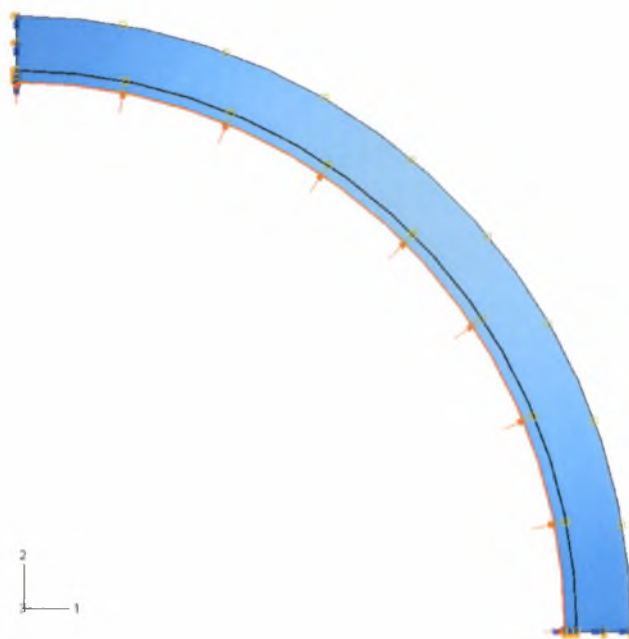


Σχήμα 4.6 : Μετατόπιση λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής

4.2.3 Εσωτερική πίεση

Το δεύτερο βήμα (step 2) της κατεργασίας είναι η επιβολή εσωτερικής πίεσης στον εσωτερικό σωλήνα. Με την εντολή “**static general**” επιβάλλουμε πίεση

$$P_{int} = 40MPa$$



Σχήμα 4.7 : Επιβολή εσωτερικής πίεσης

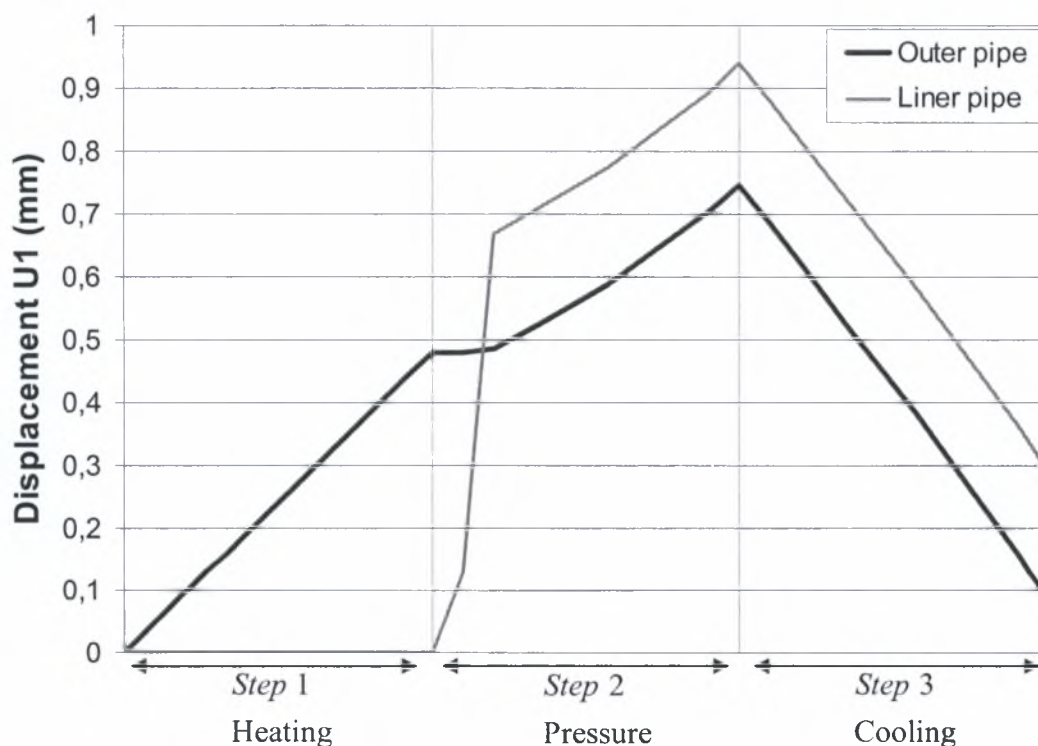
Επαφή των 2 δακτυλίων θα έχουμε όταν η μετατόπιση της εξωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού δακτυλίου (δηλαδή του κόμβου 1) φθάσει την τιμή 0.6589mm ή όταν η εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού δακτυλίου (δηλαδή του κόμβου 189) αρχίσει να μετατοπίζεται. Αυτό σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παίρνουμε από το “**odb field output**” συμβαίνει σε πίεση μεταξύ 7 και 8 MPa . Από αυτό το σημείο και πέρα, οι 2 σωλήνες βρίσκονται σε επαφή ενώ η εσωτερική πίεση συνεχίζει να αυξάνει έως την τιμή 40MPa .

Στο τέλος αυτού του βήματος, η μετατόπιση u_1 του κόμβου 95 του εξωτερικού δακτυλίου, από $u_{1,0}^{95} = 0.4809mm$ όπου ήταν στο τέλος του (step 1), γίνεται $u_{1,0}^{95} = 0.7461mm$. Αντίστοιχα για τον εσωτερικό δακτύλιο η μετατόπιση του κόμβου 48 από $u_{1,0}^{48} = 0.0 mm$ στο τέλος του (step 1) γίνεται $u_{1,0}^{48} = 0.9387mm$ Έχουμε δηλαδή ακτινική μετατόπιση των δακτυλίων λόγω της εσωτερικής πίεσης.

4.2.4 Ψύξη εξωτερικού σωλήνα

Στο τρίτο και τελευταίο βήμα της κατεργασίας (step 3) έχουμε την αποδέσμευση της εσωτερικής πίεσης και την επαναφορά της θερμοκρασίας στην αρχική της τιμή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συρρίκνωση του ενωμένου πλέον σωλήνα. Στο τέλος αυτού του βήματος η μετατόπιση του εξωτερικού δακτυλίου από $u_{l,o}^{95} = 0.7461\text{mm}$ στο τέλος του (step 2) γίνεται $u_{l,o}^{95} = 0.0886\text{mm}$

Παρακάτω απεικονίζεται γραφικά η μετατόπιση των δακτυλίων συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας. Πιο συγκεκριμένα απεικονίζονται οι μετατοπίσεις στην κατεύθυνση 1 του κόμβου 95 του εξωτερικού δακτυλίου και του κόμβου 48 του εσωτερικού δακτυλίου ως αντιπροσωπευτικές για τους 2 δακτυλίους (Πίνακας 4.3).



Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα μετατόπισης συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας

Στο τέλος της κατεργασίας, η εξωτερική διάμετρος του εξωτερικού δακτυλίου από 325mm στην απαραμόρφωτη κατάσταση γίνεται 325.2 mm.

4.3 Παραμένουσες τάσεις

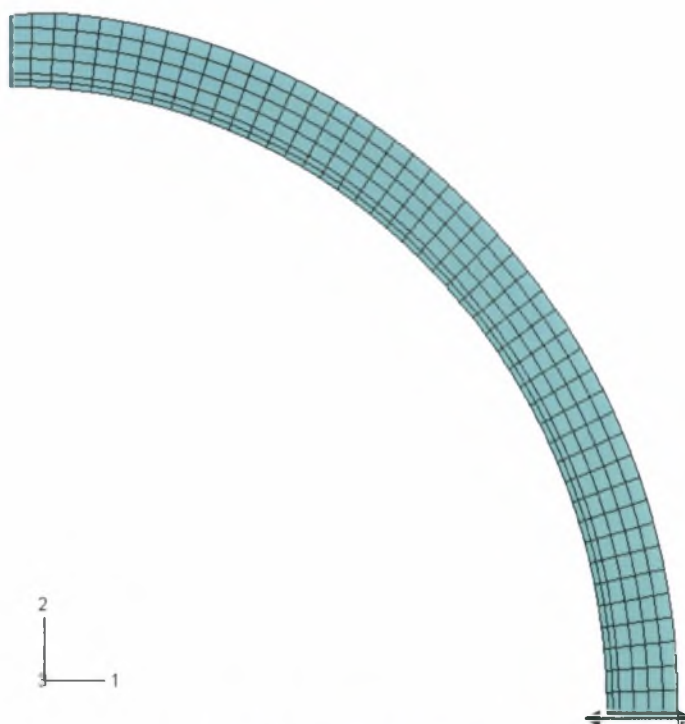
Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε την κατεργασία κατασκευής του σύνθετου σωλήνα TFP. Σε αυτή την παράγραφο θα εστιάσουμε στη δημιουργία των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από αυτή την κατεργασία.

Αρχικά μελετάμε τις παραμένουσες τάσεις όπως αυτές διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ώστε να βρούμε το στάδιο που επιβαρύνει περισσότερο τον δακτύλιο με παραμένουσες τάσεις. Στη συνέχεια απεικονίζουμε γραφικά την κατανομή στον δακτύλιο. Τέλος, μελετάμε την επιρροή τους από την μεταβολή της θερμοκρασιακής διαφοράς και της εσωτερικής πίεσης.

Οι μεταβλητές που εξετάζουμε είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (PEEQ), η ισοδύναμη τάση Von Mises, η συνολική λογαριθμική παραμόρφωση LE και η περιμετρική τάση S σε συγκεκριμένες διατομές του δακτυλίου.

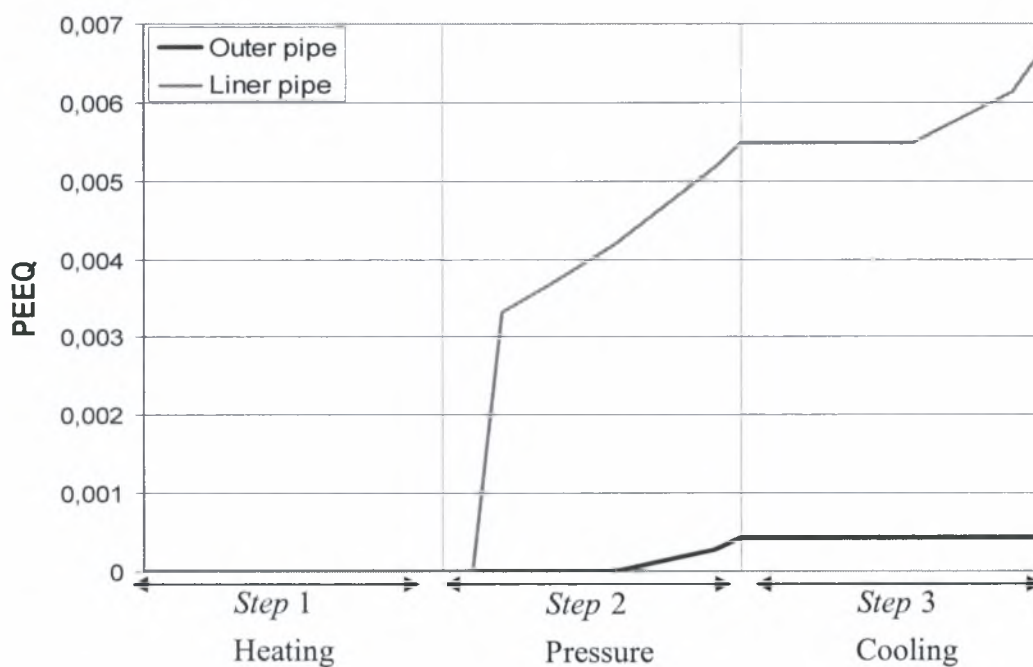
Εστιάζουμε την μελέτη μας στον κόμβο 95 για τον εξωτερικό δακτύλιο και στον κόμβο 48 για τον εσωτερικό δακτύλιο (Πίνακας 4.3) ως αντιπροσωπευτικούς για τους 2 δακτυλίους. Μελετάμε δηλαδή τη διατομή $\theta=0$.

Τα αποτελέσματα αφορούν θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = 225 - 20 = 205K$ και εσωτερική πίεση $P_{int} = 40MPa$.

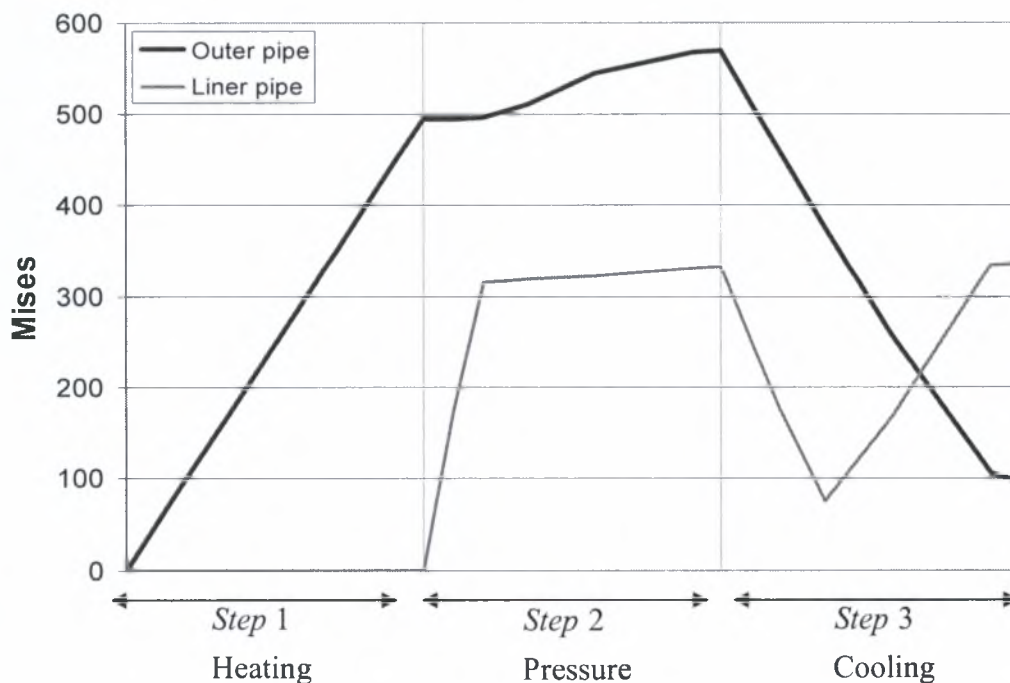


Σχήμα 4.9 : Διατομή που εξετάζεται

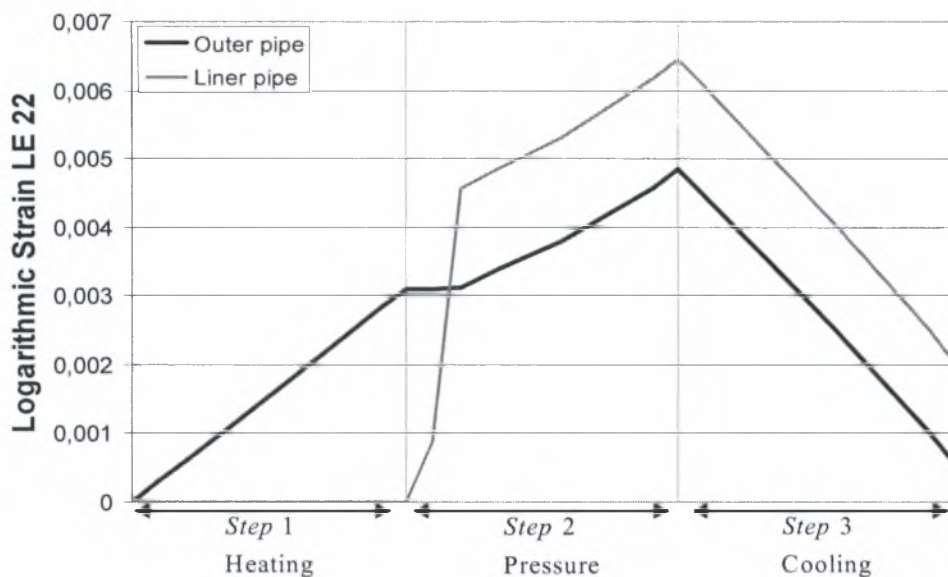
Όπως αναφέραμε, αρχικά εξετάζουμε τις παραμένουσες τάσεις κατά τη διάρκεια των βημάτων της κατεργασίας.



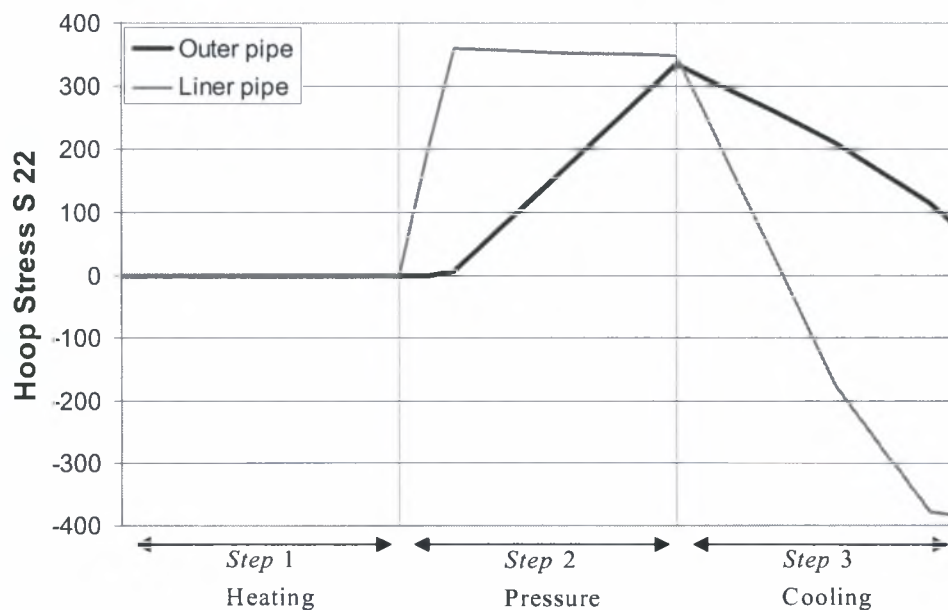
Σχήμα 4.10 (α) : Διάγραμμα ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας



Σχήμα 4.10 (β) : Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης κατά "Von Mises" συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας



Σχήμα 4.10 (γ) : Διάγραμμα συνολικής λογαριθμικής παραμόρφωσης συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας



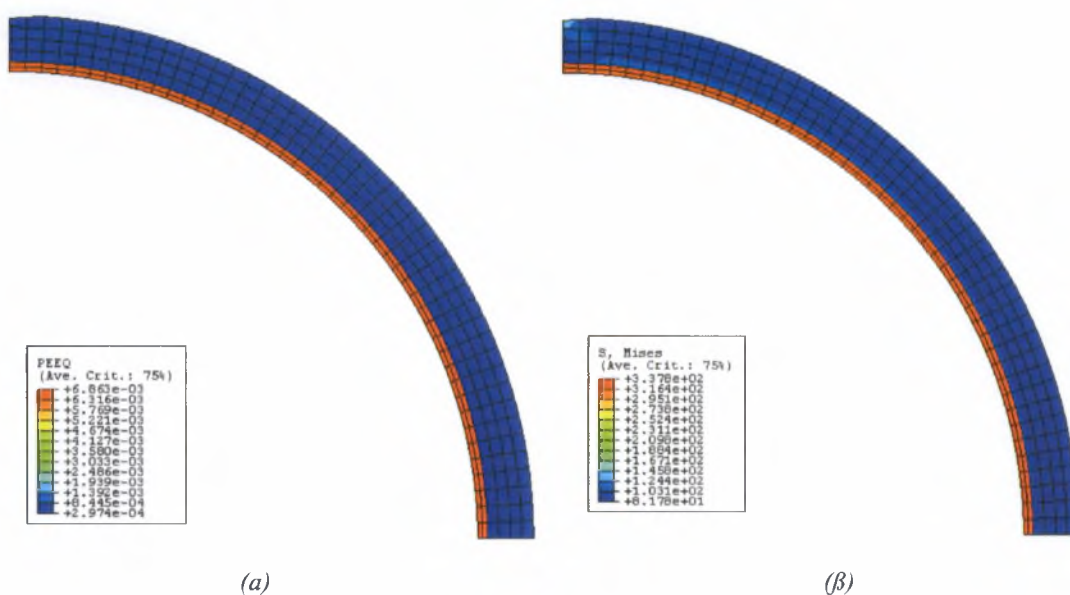
Σχήμα 4.10 (δ) : Διάγραμμα περιμετρικής τάσης συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι οι περισσότερες παραμένουσες τάσεις δημιουργούνται στο στάδιο της εσωτερικής πίεσης. Οπότε καθοριστικός παράγοντας στη δημιουργία αυτών των τάσεων είναι το μέγεθος της εσωτερικής πίεσης που επιβάλλουμε.

Διαπιστώνουμε επίσης (Σχήμα 4.10 (α)) ότι ο εσωτερικός δακτύλιος πλαστικοποιείται περισσότερο σε σχέση με τον εξωτερικό. Το συμπέρασμα αυτό θα γίνει πιο εμφανές από τα επόμενα σχήματα.

Τα μεγέθη στα Σχήματα 4.10 (γ) & (δ) είναι της παραμόρφωσης LE22 και της τάσης S22 αντίστοιχα, αφού οι κόμβοι που μελετάμε βρίσκονται στη διατομή $\theta=0$.

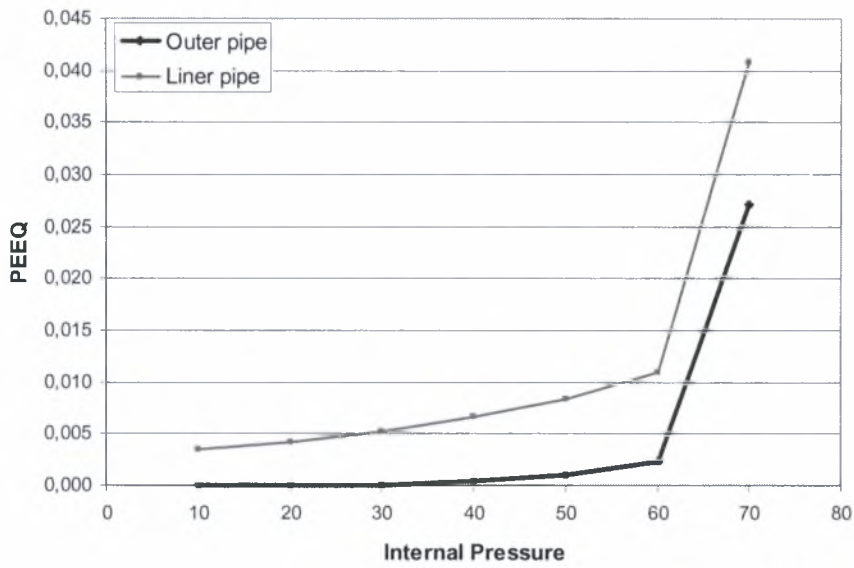
Τα επόμενα σχήματα απεικονίζουν γραφικά την κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης και της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises όπως διαμορφώνονται στο τέλος της κατεργασίας.



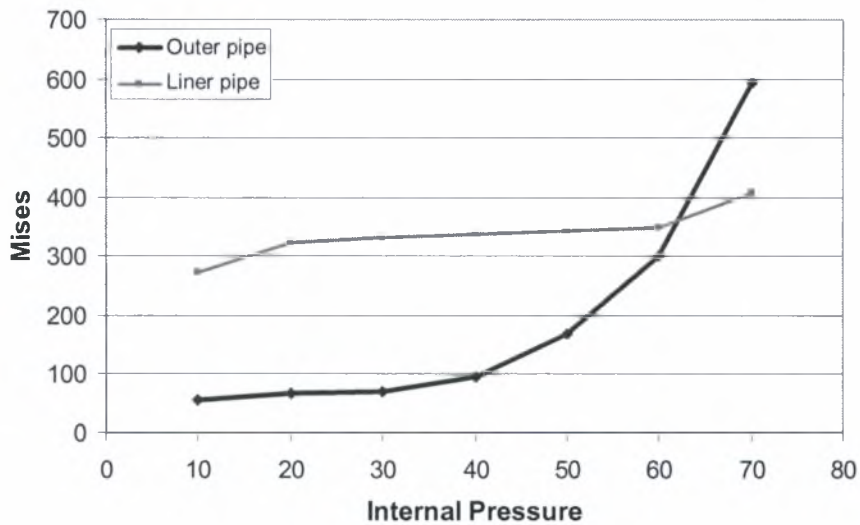
Σχήμα 4.11 : Κατανομή (α) της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης & (β) της ισοδύναμης τάσης κατά “Von Mises”

Συμπεραίνουμε λοιπόν πάλι σ’ αυτό το σημείο ότι ο εσωτερικός δακτύλιος έχει μεγαλύτερου μεγέθους παραμένουσες τάσεις από τον εξωτερικό. Επίσης παρατηρούμε ότι η κατανομή είναι γενικά ομοιόμορφη περιφερειακά του δακτυλίου, εκτός από την περιοχή που βρίσκεται η ατέλεια, όπου εκεί παρατηρούμε μεγαλύτερες τάσεις και παραμορφώσεις.

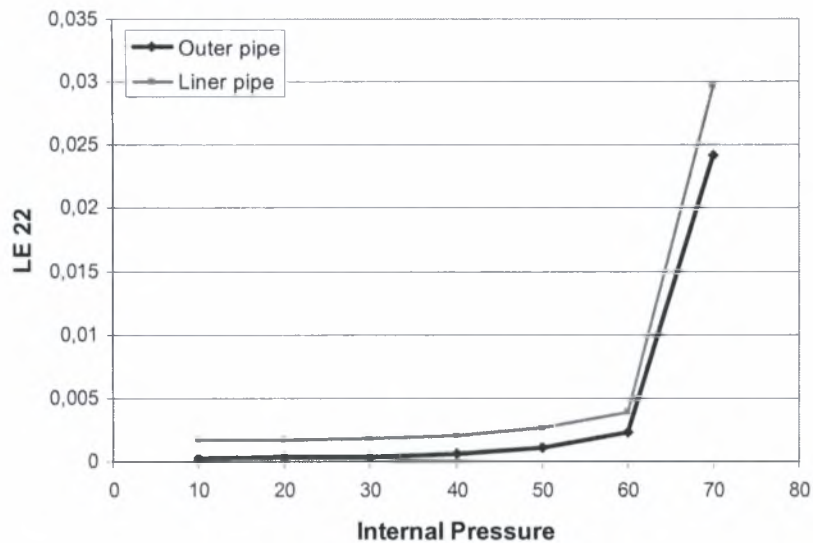
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμενουσών μεγεθών που μελετάμε, στο τέλος της κατεργασίας, συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης για σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = 225 - 20 = 205K$.



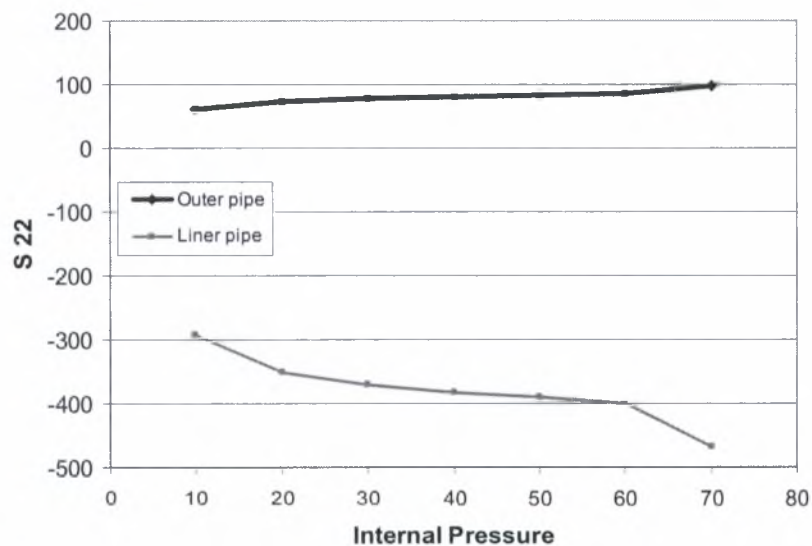
Σχήμα 4.12 (α) : Διάγραμμα ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης για σταθερή διαφορά θερμοκρασίας



Σχήμα 4.12 (β) : Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης κατά “Von Mises” συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης για σταθερή διαφορά θερμοκρασίας



Σχήμα 4.12 (γ) : Διάγραμμα συνολικής λογαριθμικής παραμόρφωσης συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης για σταθερή διαφορά θερμοκρασίας



Σχήμα 4.12 (δ) : Διάγραμμα περιμετρικής τάσης συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης για σταθερή διαφορά θερμοκρασίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι παραμένουσες τάσεις γενικά αυξάνονται όσο αυξάνεται η εσωτερική πίεση. Επίσης το ίδιο συμβαίνει και καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία για σταθερή εσωτερική πίεση. Αυτό όπως είναι αναμενόμενο, πρόκειται να επηρεάσει την αντοχή του αγωγού.

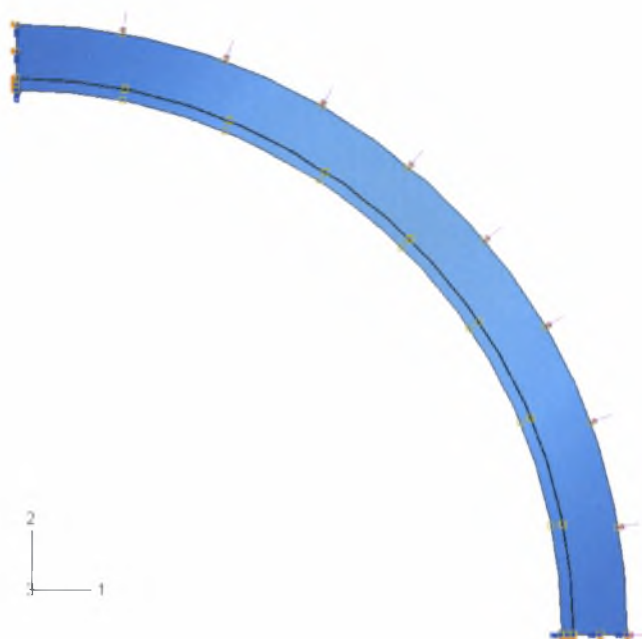
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΥΠΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε η κατεργασία κατασκευής του αγωγού TFP και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται από αυτή την κατεργασία. Σ' αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί η αντοχή του αγωγού TFP σε εξωτερική πίεση καθώς και η επίδραση των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας στην αντοχή του αγωγού.

5.1 Αριθμητική προσομοίωση

Συνεχίζοντας λοιπόν την προσομοίωση που έγινε για την μελέτη της κατεργασίας κατασκευής του αγωγού TFP στην παράγραφο 4.2 του κεφαλαίου 4, προσθέτουμε ένα τέταρτο βήμα (step 4) στο οποίο επιβάλλουμε εξωτερική πίεση στον σωλήνα.



Σχήμα 5.1 : Επιβολή εξωτερικής πίεσης

Η συμπεριφορά του μοντέλου κατά την κατάρρευση είναι ένα γεωμετρικά μη γραμμικό πρόβλημα με ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά, συνεπώς για την επιβολή της πίεσης εφαρμόζουμε τη μέθοδο μήκους τόξου (μέθοδος Riks).

Η μέθοδος Riks υπολογίζει τις θέσεις στατικής ισορροπίας κατά μήκος του δρόμου ισορροπίας όπου το μητρώο ακαμψίας είναι αρνητικό, δηλαδή η απόκριση πίεσης P - μετατόπισης w είναι ασταθής. $\Delta P = [K] \cdot \Delta w$ με $\det[K] < 0$. Η μέθοδος χρησιμοποιεί το μέγεθος της πίεσης που επιβάλλεται ως έναν επιπλέον άγνωστο και επιλύει ταυτόχρονα ως προς φορτία και μετατοπίσεις, ενώ χρησιμοποιεί την ποσότητα «μήκος τόξου» για να εκτιμηθεί η πρόοδος της λύσης.

Η τιμή της πίεσης P σε κάθε χρονική επαύξηση (increment) είναι :

$$P = P_0 + \lambda (P_{ref} - P_0) \quad (5.1)$$

όπου λ είναι ο αναλογικός συντελεστής φόρτισης LPF (Load Proportionality Factor) τον οποίο υπολογίζει το ABAQUS σε κάθε increment, P_{ref} είναι η πίεση αναφοράς που δίνει ο χρήστης, ενώ P_0 είναι τα «νεκρά φορτία» (dead loads) τα οποία υπάρχουν από προηγούμενα βήματα (step), δεν επαναπροσδιορίζονται και έχουν σταθερή τιμή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Επειδή όμως στην προκειμένη περίπτωση δεν υπάρχουν φορτία από προηγούμενα βήματα, το φορτίο $P_0 = 0$.

Συνεπώς η σχέση (5.1) γίνεται

$$P = \lambda \cdot P_{ref} \quad (5.2)$$

Η αρχική τιμή λ_{in} του συντελεστή λ δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\lambda_{in} = \frac{\Delta \lambda_{in}}{l_{period}} \quad (5.3)$$

όπου $\Delta \lambda_{in}$, l_{period} παράμετροι που δίνονται από το χρήστη και προσδιορίζουν την εντολή ***Static, riks**.

Έτσι λοιπόν δημιουργήσαμε αυτό το τέταρτο βήμα (step 4) χρησιμοποιώντας την εντολή ***Static, riks** με $P_{ref} = 50$, $\Delta \lambda_{in} = 0.1$ και $l_{period} = 1$.

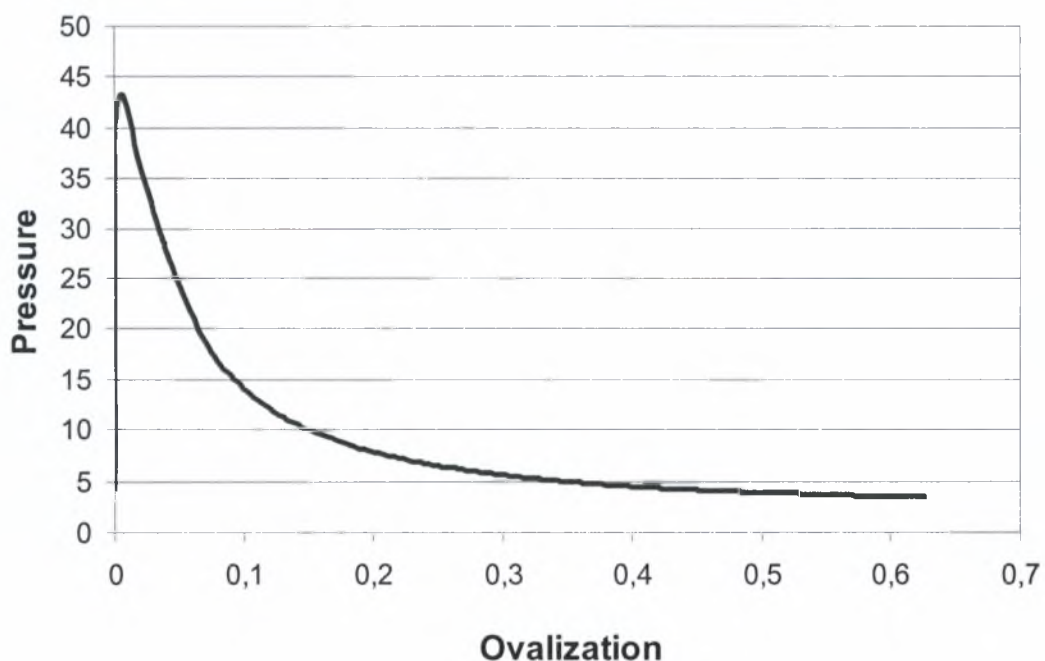
Θυμίζουμε ότι σε αυτή την προσομοίωση (παράγραφος 4.2.1) χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης CPE8R τα οποία είναι οκτακομβικά μειωμένης ολοκλήρωσης (2X2). Επίσης προσομοιώθηκε μόνο το $\frac{1}{4}$ του αγωγού λόγω των συμμετριών που ισχύουν στους άξονες 1 και 2. Για να επιβάλουμε αυτές τις συμμετρίες έχουμε εφαρμόσει στα άκρα κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.

5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση που μελετάται αφορά μεταβολή θερμοκρασίας (για το step 1) $\Delta T = 225 - 20 = 205K$ και εσωτερική πίεση (για το step 2) $P_{int} = 40MPa$.

Από την προσομοίωση αυτή, η τιμή της μέγιστης πίεσης προκύπτει ίση με $P_{max} = 43.3825MPa$. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση $P = \lambda \cdot P_{ref}$ (5.2) με $P_{ref} = 50$ και $\lambda_{max} = 0.86765$ το οποίο πήραμε από τα αποτελέσματα της ανάλυσης (“odb field output”).

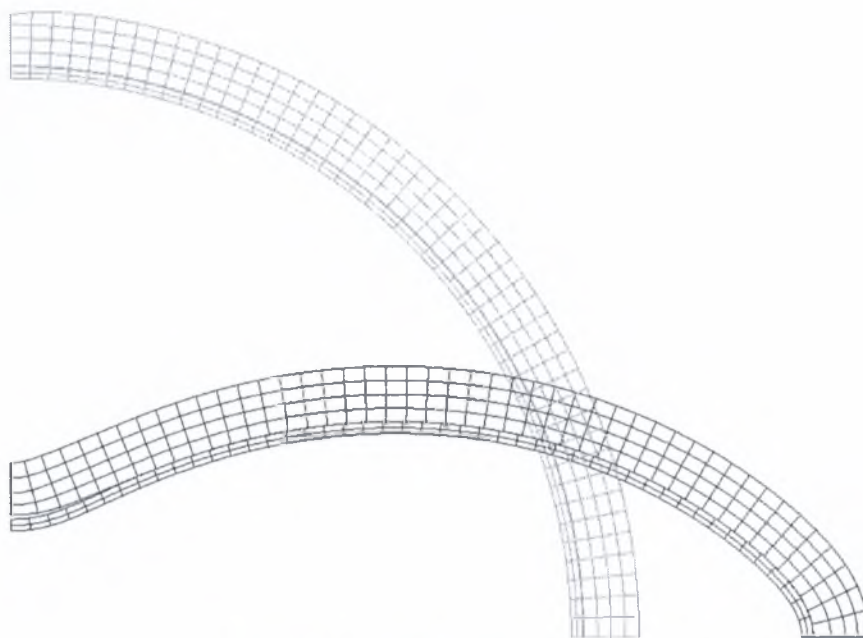
Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζουμε γραφικά τα αποτελέσματα της εξωτερικής πίεσης συναρτήσει της μεταβλητής Ovalization (σχέση 3.6).



Σχήμα 5.2 : Εξωτερική πίεση συναρτήσει της μεταβλητής Ovalization

Η μέγιστη τιμή του διαγράμματος είναι η μέγιστη πίεση που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας χωρίς να αστοχήσει. Η τιμή αυτή είναι $P_{\max} = 43.38 \text{ MPa}$.

Η μορφή κατάρρευσης του σωλήνα είναι η τυπική μορφή κατάρρευσης των δακτυλίων “ισοπέδωση” ή “flattening”.



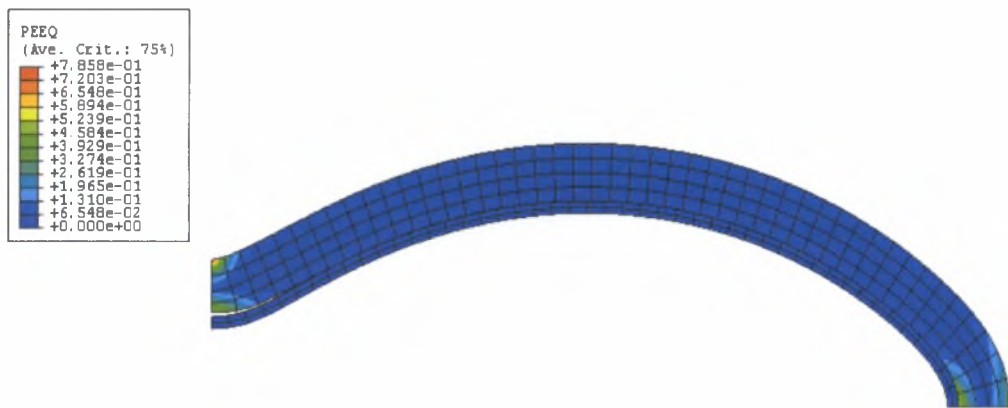
Σχήμα 5.3 : Μορφή κατάρρευσης σωλήνα

Υπενθυμίζουμε ότι η αντοχή του εξωτερικού σωλήνα σε εξωτερική πίεση όπως υπολογίσαμε στο Κεφάλαιο 3 είναι $P_{\max} = 44.08 \text{ MPa}$, ενώ η αντοχή του εσωτερικού σωλήνα $P_{\max} = 0.471 \text{ MPa}$.

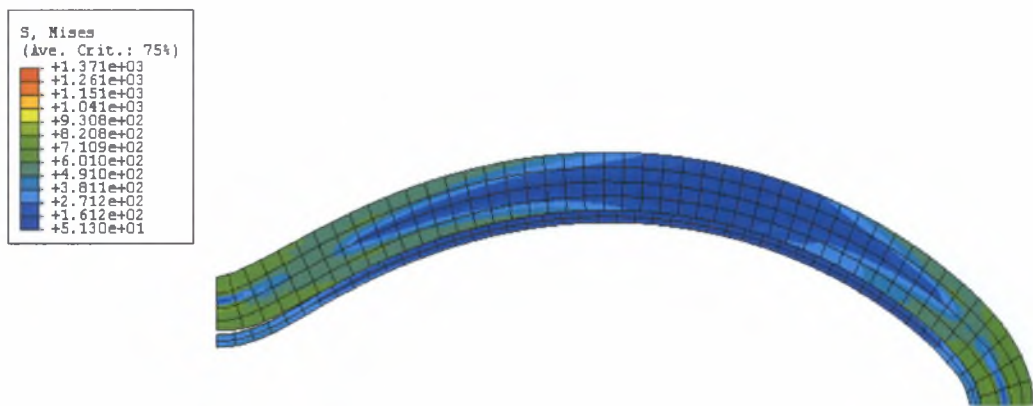
Διαπιστώνουμε ότι, παρά τις προσδοκίες μας για πιθανή αύξηση της αντοχής λόγω του διπλού τοιχώματος, η αντοχή του σωλήνα TFP είναι μικρότερη από την αντοχή του εξωτερικού σωλήνα παρόλο που τον «ενισχύσαμε» με έναν εσωτερικό σωλήνα. Αυτό συμβαίνει διότι από την διαδικασία κατασκευής του σωλήνα προκύπτουν σημαντικές παραμένουσες τάσεις, όπως είδαμε στην παράγραφο 4.3 του προηγούμενου κεφαλαίου, με αποτέλεσμα την μείωση του ορίου αντοχής του σωλήνα TFP.

5.3 Εντατική κατάσταση

Στην παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε την κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (Equivalent Plastic Strain, PEEQ) και της ισοδύναμης τάσης κατά “Von Mises” στον δακτύλιο κατά την κατάρρευση.



Σχήμα 5.4 (α) : Κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης



Σχήμα 5.4 (β) : Κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά “Von Mises”

Βλέπουμε από το σχήμα 5.4 (α) ότι οι τιμές της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στις διατομές $\theta=0$ και $\theta=\pi/2$ είναι μεγαλύτερες από το υπόλοιπο μέρος του δακτυλίου όπου η τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης είναι μηδέν.

Παρατηρούμε επίσης από το σχήμα 5.4 (α) ότι η περιοχή της ατέλειας του εξωτερικού δακτυλίου παρουσιάζει εντονότερη πλαστικοποίηση.

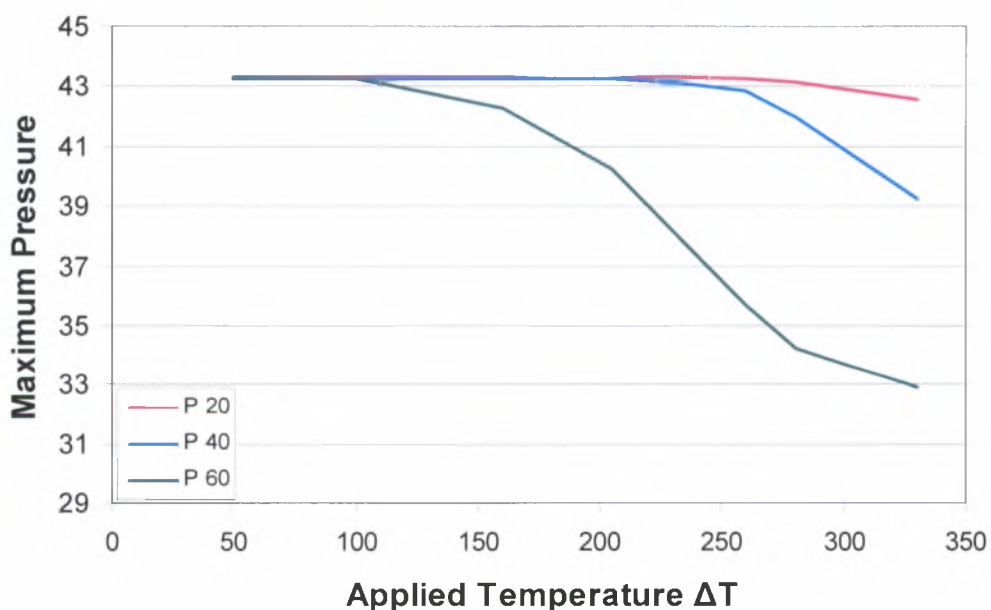
5.4 Επιρροή των φυσικών παραμέτρων

Μέχρι τώρα η μελέτη που έχουμε κάνει για την κατεργασία κατασκευής του αγωγού TFP και την εξωτερική πίεση, αφορά μεταβολή θερμοκρασίας (για το step 1) $\Delta T = 225 - 20 = 205K$ και εσωτερική πίεση (για το step 2) $P_{int} = 40MPa$.

Σ' αυτή την παράγραφο θα μελετήσουμε την επιρροή της μεταβολής θερμοκρασίας ΔT και της εσωτερικής πίεσης P_{int} , κατά τα στάδια 1 και 2 της κατεργασίας αντίστοιχα, στην αντοχή του σωλήνα.

5.4.1 Διαφορά θερμοκρασίας

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη μεταβολή της μέγιστης εξωτερικής πίεσης P_{max} , που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας χωρίς να αστοχήσει, συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας ΔT για σταθερή τιμή της εσωτερικής πίεσης P_{int} .

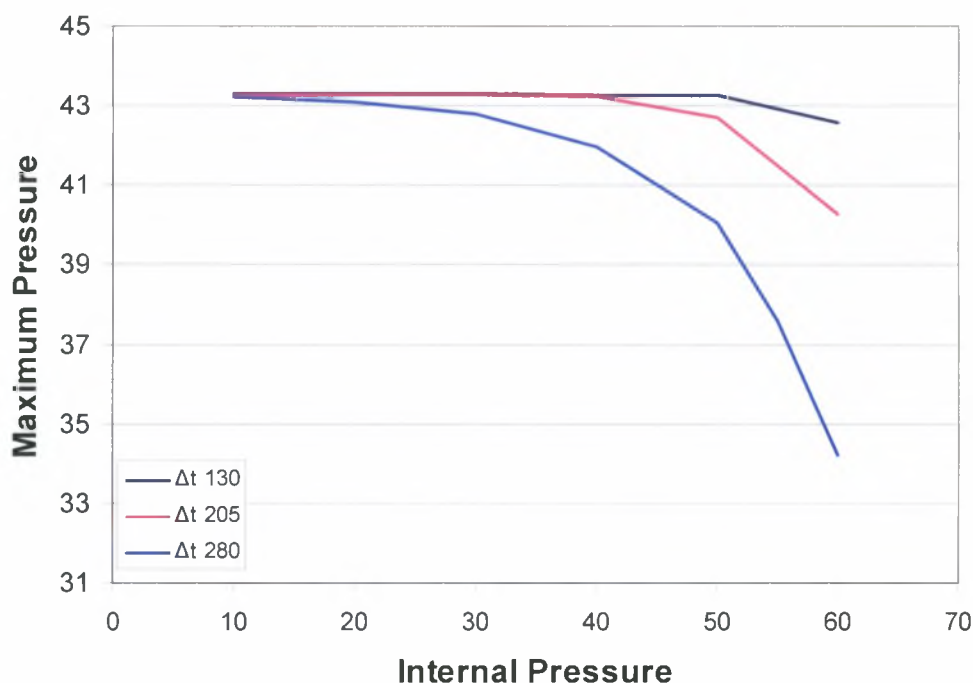


Σχήμα 5.6 : Διάγραμμα μέγιστης πίεσης συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας

Παρατηρούμε ότι για σταθερή τιμή της εσωτερικής πίεσης η μέγιστη πίεση που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας μειώνεται όσο αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας.

5.4.2 Εσωτερική πίεση

Το επόμενο διάγραμμα απεικονίζει τη μεταβολή της μέγιστης εξωτερικής πίεσης P_{\max} συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης P_{int} για σταθερή τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας ΔT .



Σχήμα 5.7 : Διάγραμμα μέγιστης πίεσης συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης

Παρατηρούμε ότι για σταθερή τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας η μέγιστη πίεση που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας μειώνεται όσο αυξάνεται η εσωτερική πίεση.

Γενικά από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι καθώς αυξάνουμε την θερμοκρασιακή διαφορά ΔT ή την τιμή της εσωτερικής πίεσης P_{int} , μειώνεται η τιμή της μέγιστης πίεσης P_{\max} που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας χωρίς να αστοχήσει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση αυτών των 2 παραμέτρων δημιουργούνται περισσότερες παραμένουσες τάσεις στο σωλήνα κατά την κατεργασία κατασκευής όπως είδαμε στην παράγραφο 4.3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκε το μοντέλο του αγωγού διπλού τοιχώματος TFP εξετάζοντας τη διαδικασία κατασκευής, τις παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την κατεργασία, την επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας καθώς και την αντοχή του αγωγού σε εξωτερική πίεση.

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί ένα μοντέλο αγωγού TFP για διαστάσεις δακτυλίων με μικρότερη τιμή του λόγου $\frac{D}{t}$, δηλαδή για πιο «παχείς» δακτυλίους, το οποίο μελέτησαν οι Focke et al. (2004). Σκοπός είναι η εξαγωγή γενικότερων και ακριβέστερων συμπερασμάτων όσον αφορά τη μελέτη γύρω από τους αγωγούς TFP.

6.1 Αριθμητική προσομοίωση σωλήνα TFP

6.1.1 Περιγραφή δακτυλίων

Τα χαρακτηριστικά των δακτυλίων που αποτελούν τον σωλήνα TFP είναι :

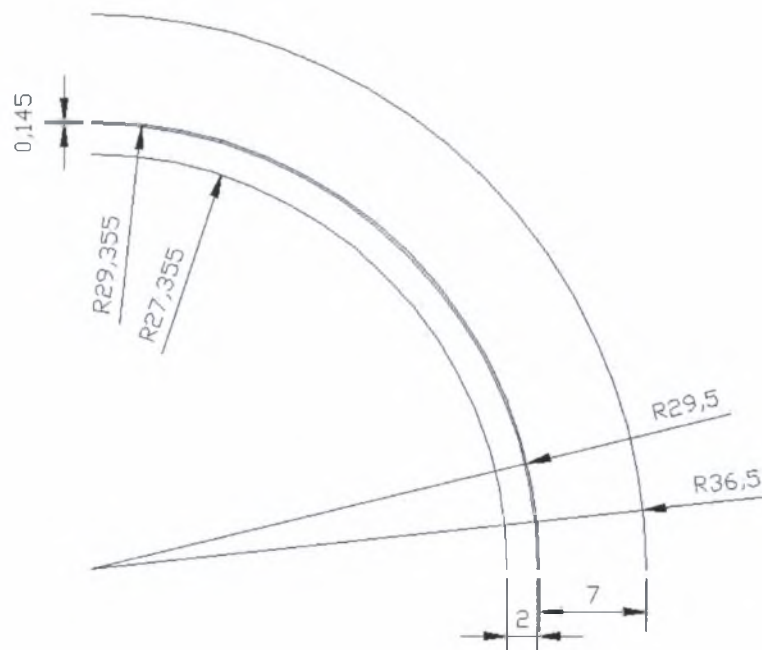
➤ Εξωτερικός δακτύλιος

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o = 73mm$
- Πάχος του σωλήνα : $t_o = 7mm$
- Λόγος διαμέτρου προς πάχος : $\frac{D_o}{t_o} = \frac{73}{7} = 10.42$
- Τάση διαρροής : $\sigma_{y,o} = 80^{ksi} = 80 \times 6.89 = 551.2MPa$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E_o = 195000MPa$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$
- Συντελεστής θερμικής διαστολής : $\alpha_o = 0.0000116 \text{ } 1/^{\circ}C = 1.16 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}C$

Γνωρίζουμε ότι υπάρχει αρχικό κενό $g = 0.145mm$ ανάμεσα στους 2 σωλήνες πριν από την θέρμανση του εξωτερικού σωλήνα και την εφαρμογή εσωτερικής πίεσης στον εσωτερικό σωλήνα.

➤ **Εσωτερικός δακτύλιος**

- Εξωτερική διάμετρος : $d_o = 58.71mm$
- Πάχος του σωλήνα : $t_l = 2mm$
- Λόγος διαμέτρου προς πάχος : $\frac{d_o}{t_l} = \frac{58.71}{2} = 29.355$
- Τάση διαρροής : $\sigma_{y,l} = 431.64 \frac{N}{mm^2}$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E_l = 206010MPa$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$
- Συντελεστής θερμικής διαστολής : $\alpha_l = 0.000014 \text{ } 1/^{\circ}C = 1.40 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}C$



Σχήμα 6.1 : Διαστάσεις αγωγού TFP

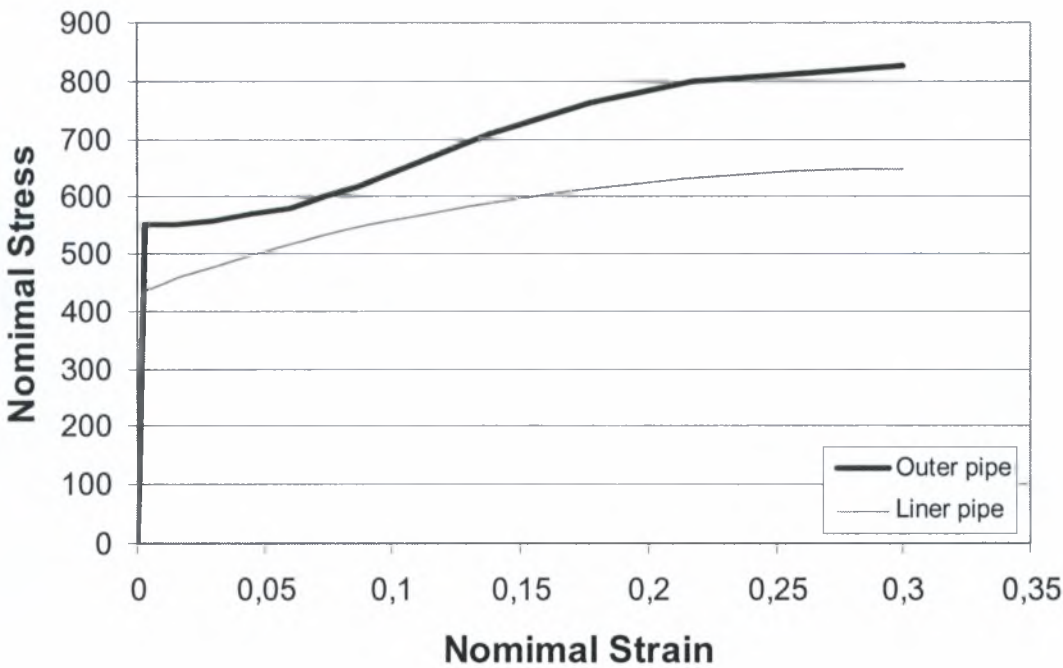
Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία των διαστάσεων των 2 δακτυλίων.

	Εξωτερικός δακτύλιος		Εσωτερικός δακτύλιος	
	Διάμετρος	Ακτίνα	Διάμετρος	Ακτίνα
Εξωτερική	$D_o = 73mm$	$R_o = 36.5mm$	$d_o = 58.71mm$	$r_o = 29.355mm$
Μεσαία	$D_m = 66mm$	$R_m = 33mm$	$d_m = 56.71mm$	$r_m = 28.355mm$
Εσωτερική	$D_i = 59mm$	$R_i = 29.5mm$	$d_i = 54.71mm$	$r_i = 27.355mm$

Πίνακας 6.1 : Στοιχεία διαστάσεων δακτυλίων

6.1.2 Ιδιότητες υλικών

Το υλικό του εξωτερικού σωλήνα είναι χάλυβας **API L80** ενώ του εσωτερικού σωλήνα ανοξείδωτος χάλυβας **Inconel 625**. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται οι καμπύλες ονομαστικής τάσης - ονομαστικής παραμόρφωσης των 2 υλικών.



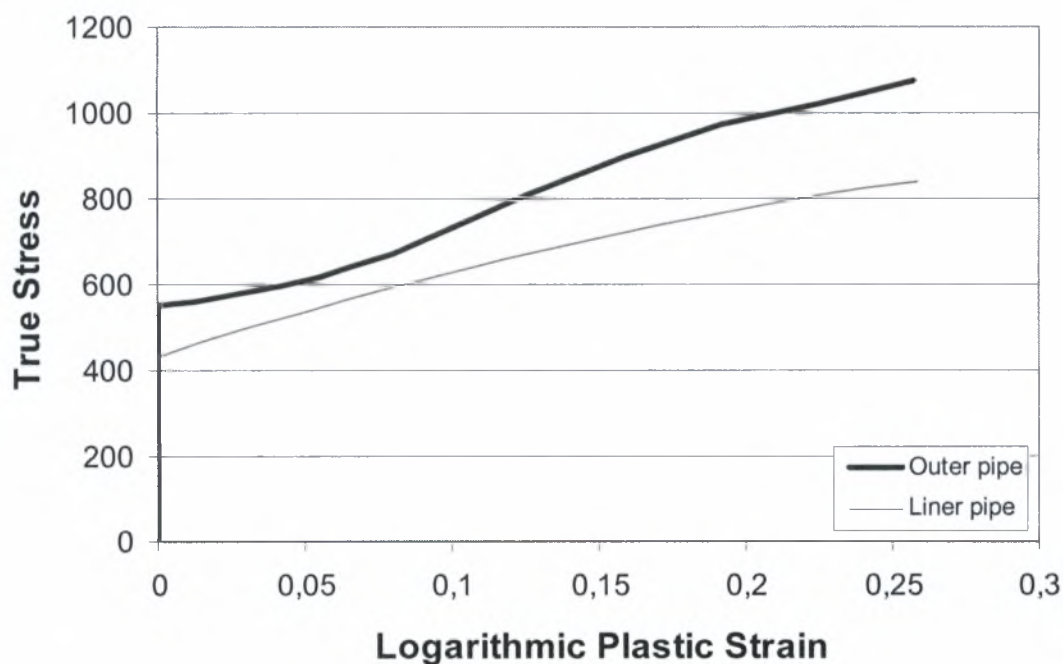
Σχήμα 6.2 : Διάγραμμα ονομαστικής τάσης - ονομαστικής παραμόρφωσης

Για την προσομοίωση του υλικού στο ABAQUS τροποποιήθηκαν οι τιμές ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης (σ_{nom}, e) του παραπάνω διαγράμματος, σε τιμές πραγματικής τάσης – λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης $(\sigma_T, \varepsilon_{ln}^p)$ σύμφωνα με τους τύπους :

$$\sigma_T = \sigma_{nom}(1 + e) \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + e) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (6.2)$$

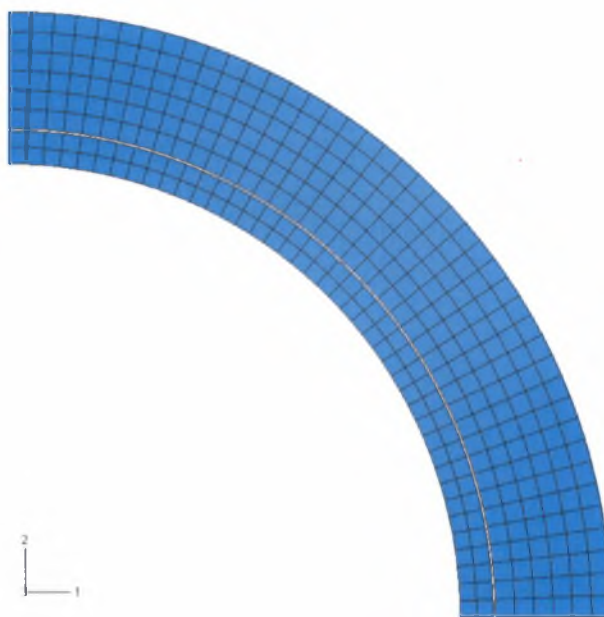
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι τροποποιημένες τιμές πραγματικής τάσης – λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 6.3 : Καμπύλη πραγματικής τάσης - λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης

6.1.3 Περιγραφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Για την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν διδιάστατα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης CPE4 τα οποία είναι 4-κομβικά πλήρους ολοκλήρωσης (2X2). Δημιουργήθηκε πλέγμα με 42 ομοιόμορφα κατανεμημένα στοιχεία κατά την περιφέρεια και 6 κατά το πάχος για τον εξωτερικό σωλήνα και 42 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος για τον εσωτερικό σωλήνα (Σχήμα 6.4).



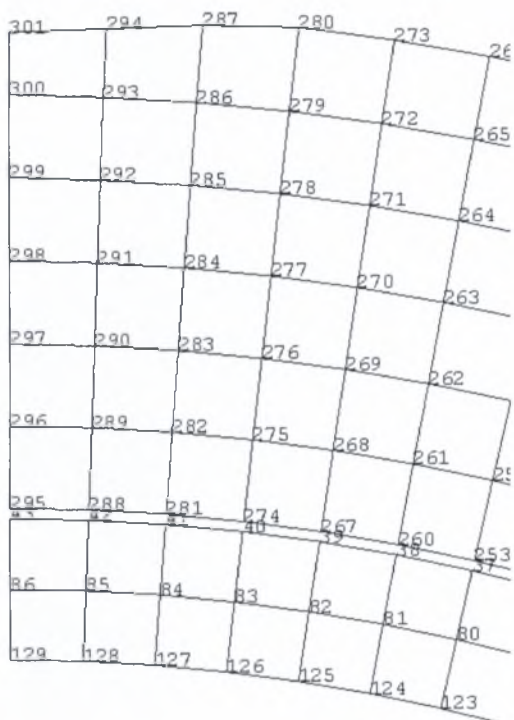
Σχήμα 6.4 : Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το σωλήνα TFP

Επίσης λόγω των συμμετριών ως προς τους άξονες 1 & 2, προσομοιώθηκε μόνο το $\frac{1}{4}$ των δακτυλίων. Γι' αυτό το λόγο επιβάλλαμε στα άκρα κατάλληλες οριακές συνθήκες συμμετρίας, ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες συμβιβαστού για τις μετατοπίσεις και τις στροφές.

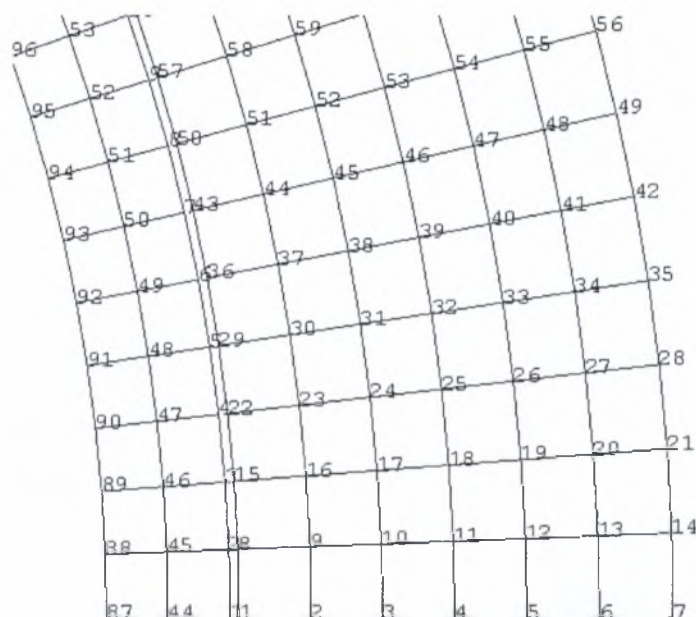
Η συμπεριφορά του μοντέλου κατά την κατάρρευση είναι ένα γεωμετρικά μη γραμμικό πρόβλημα με ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά, οπότε για την επιβολή της πίεσης χρησιμοποιείται η μέθοδος Riks. Η μέθοδος απαιτεί το μοντέλο να έχει μια μικρή αρχική ατέλεια ώστε το φορτίο να ακολουθήσει τον μεταλυγισμικό δρόμο ισορροπίας.

Δημιουργήσαμε λοιπόν μια αρχική ατέλεια στο μοντέλο ώστε το φορτίο να ακολουθήσει το μεταλυγισμικό δρόμο ισορροπίας. Πιο συγκεκριμένα η τοπική

ατέλεια η οποία δημιουργήσαμε (Σχήμα 6.5α) είναι στο άνω αριστερό άκρο του εξωτερικού σωλήνα και είναι μεγέθους $s = \frac{R_o - R_{ar}}{t_i} = \frac{36.5 - 36.2}{7} = 4.3\%$



(α)



(β)

Σχήμα 6.5(α) : Αρχική ατέλεια, άνω αριστερή διατομή ($\theta=\pi/2$) & (β) Κάτω δεξιά διατομή ($\theta=0$)

Οι κόμβοι που κυρίως μας ενδιαφέρουν είναι οι εξής :

<u>Εξωτερικός δακτύλιος</u>		
Κόμβος	Συντεταγμένες	
	x	y
301	0.	29.5
298	0.	32.98874
295	0.	36.2
7	36.5	0.
4	32.98904	0.
1	29.5	0.

<u>Εσωτερικός δακτύλιος</u>		
Κόμβος	Συντεταγμένες	
	x	y
43	0.	29.355
86	0.	28.34802
129	0.	27.355
1	29.355	0.
44	28.34802	0.
87	27.355	0.

Πίνακας 6.2 : Συντεταγμένες «χαρακτηριστικών» κόμβων

6.2 Ευστάθεια δακτυλίων υπό εξωτερική πίεση

Πριν προχωρήσουμε στην αριθμητική προσομοίωση του αγωγού TFP υπολογίζουμε την αντοχή σε εξωτερική πίεση των δακτυλίων που τον συνθέτουν ώστε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση της αντοχής του αγωγού. Αρχικά θα εξετάσουμε την αναλυτική λύση (σύμφωνα με την ανάλυση ευστάθειας λεπτότοιχων δακτυλίων που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2) και στη συνέχεια θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής με την υπολογιστική λύση των πεπερασμένων στοιχείων.

6.2.1 Αναλυτική λύση

➤ Κρίσιμο φορτίο λυγισμού

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο 2^ο κεφάλαιο, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης δίνεται από τον τύπο

$$P_{cr} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^3.$$

➤ Εξωτερικός δακτύλιος

$$P_{cr} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t_o}{D_m} \right)^3 = \frac{2 \cdot 195000}{1-0.09} \left(\frac{7}{66} \right)^3 = 511.31 \text{ MPa}$$

➤ Εσωτερικός δακτύλιος

$$P_{cr} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t_i}{d_m} \right)^3 = \frac{2 \cdot 206010}{1-0.09} \left(\frac{2}{56.71} \right)^3 = 19.86 \text{ MPa}$$

➤ Κρίσιμο φορτίο πλαστικοποίησης

Η πίεση που απαιτείται για πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής είναι :

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D},$$

όπου σ_y είναι το τροποποιημένο όριο διαρροής για επίπεδη παραμόρφωση, το οποίο για κριτήριο διαρροής “Von Mises” μπορεί να θεωρηθεί ίσο με $\sigma_y = 1.13 \times \sigma_{y,0}$. Οπότε

$$P_y = 2 \times 1.13 \times \sigma_y \frac{t}{D}.$$

➤ **Εξωτερικός δακτύλιος**

$$P_y = 2 \times 1.13 \times \sigma_{y,0} \times \frac{t_o}{D_m} = 2 \times 1.13 \times 551.2 \times \frac{7}{73} = 119.45 \text{ MPa}$$

➤ **Εσωτερικός δακτύλιος**

$$P_y = 2 \times 1.13 \times \sigma_{y,i} \frac{t_i}{d_m} = 2 \times 1.13 \times 431.64 \times \frac{2}{56.71} = 34.4 \text{ MPa}$$

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται τα κρίσιμα φορτία για τους δακτυλίους που υπολογίστηκαν στην παραπάνω ανάλυση.

	Εξωτερικός δακτύλιος	Εσωτερικός δακτύλιος
Φορτίο λυγισμού	$P_{cr} = 511.31 \text{ MPa}$	$P_{cr} = 19.86 \text{ MPa}$
Φορτίο πλαστικοποίησης	$P_y = 119.45 \text{ MPa}$	$P_y = 34.4 \text{ MPa}$

Πίνακας 6.3 : Κρίσιμα φορτία δακτυλίων

Για να ισχύει η ελαστική θεωρία των δακτυλίων θα πρέπει $P_{cr} \leq P_y$. Διαπιστώνουμε ότι για τον εσωτερικό δακτύλιο ισχύει η ελαστική θεωρία ενώ για τον εξωτερικό δακτύλιο $P_y \leq P_{cr}$. Αυτό σημαίνει πως όταν η τιμή της εξωτερικής πίεσης φθάσει την τιμή $P = P_y$ ο δακτύλιος θα πλαστικοποιηθεί, οπότε δεν έχουμε ελαστική συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο δακτύλιος θεωρείται «παχύς» καθώς έχει λόγο διαμέτρου προς πάχος $\frac{D_o}{t_o} = 10.42$ ο οποίος είναι σημαντικά μικρότερος

από τον «κρίσιμο» λόγο $\frac{D_o}{t_o} > \sqrt{\frac{E}{1.125 \sigma_y (1 - \nu^2)}} = \sqrt{\frac{195000}{1.125 \times 551.2 (1 - 0.09)}} = 18.59.$

Από τις παραπάνω τιμές διαπιστώνουμε ότι για τον εξωτερικό σωλήνα η πιο «επικίνδυνη» περίπτωση είναι αυτή της πίεσης πλήρους πλαστικοποίησης, ενώ για τον εσωτερικό σωλήνα η «κρίσιμη» περίπτωση είναι αυτή του λυγισμού.

6.2.2 Σύγκριση με πεπερασμένα στοιχεία

Για τον ακριβή υπολογισμό της μέγιστης πίεσης που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας χωρίς να αστοχήσει, προχωρήσαμε προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία. Χρησιμοποιήσαμε 4-κομβικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης CPE4.

6.2.2.1 Ανάλυση ιδιοτιμών για τον υπολογισμό της κρίσιμης ελαστικής πίεσης

Προσομοιώθηκε αρχικά ένα μοντέλο δακτυλίου χωρίς αρχική ατέλεια ώστε να γίνει έλεγχος ιδιοτιμών. Το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης μας δίνει την κρίσιμη πίεση ελαστικού λυγισμού και είναι :

- ο για τον εξωτερικό δακτύλιο $P_{\max} = 493.27 MPa$
- ο για τον εσωτερικό δακτύλιο $P_{\max} = 18.561 MPa$

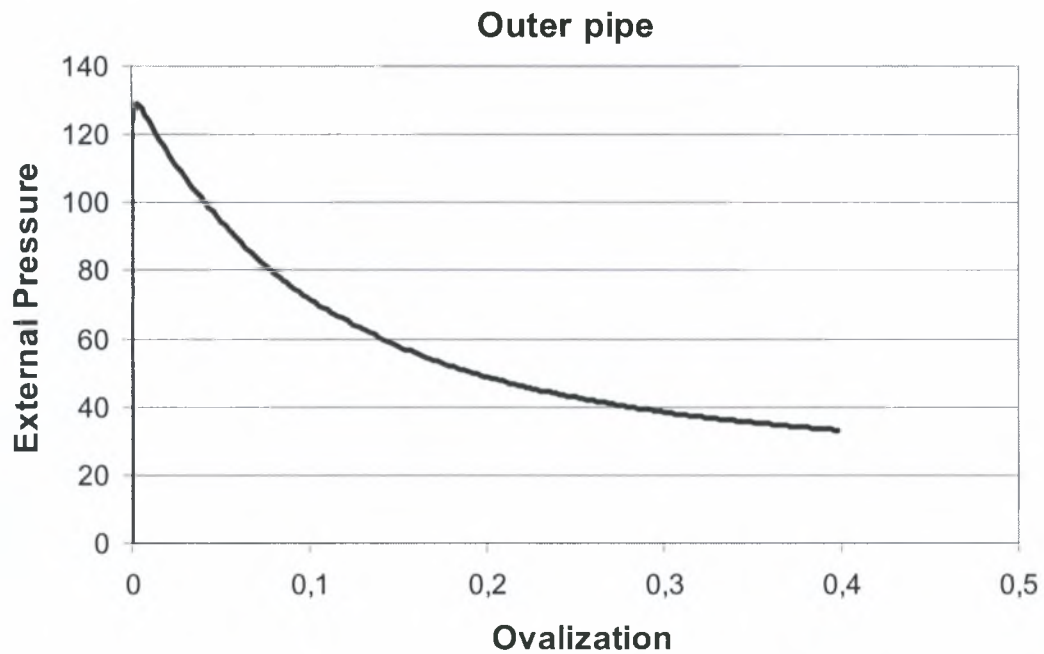
6.2.2.2 Δακτύλιος με μικρή ατέλεια

Επιβάλλουμε μια μικρή αρχική ατέλεια στους δακτυλίους ώστε ο δρόμος ισορροπίας στο σημείο διακλάδωσης να ακολουθήσει τον μεταλυγισμικό δρόμο. Εφαρμόζοντας λοιπόν πίεση στον δακτύλιο με την μέθοδο Riks παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα :

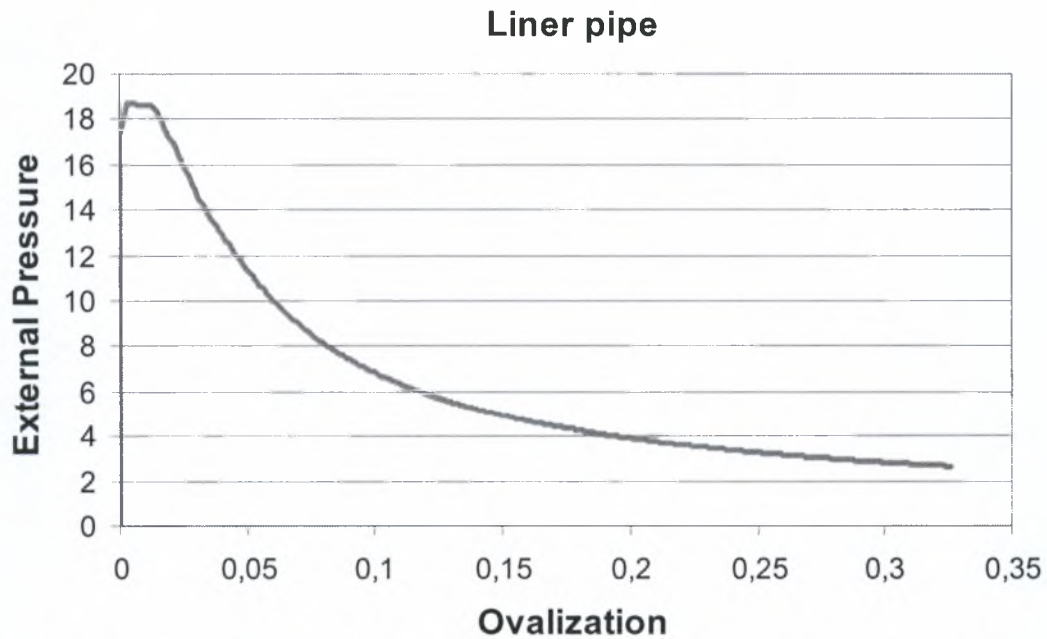
- ο μέγιστη πίεση για τον εξωτερικό δακτύλιο $P_{\max} = 128.91 MPa$
- ο μέγιστη πίεση για τον εσωτερικό δακτύλιο $P_{\max} = 18.67 MPa$

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η πίεση που επιβάλλεται στο

δακτύλιο συναρτήσει της μεταβλητής Ovalization $J = \frac{\left| w(0) - w\left(\frac{\pi}{2}\right) \right|}{D}$.



Σχήμα 6.6 (α) : Διάγραμμα εξωτερικής πίεσης συναρτήσει του Ovalization για τον εξωτερικό δακτύλιο



Σχήμα 6.6 (β) : Διάγραμμα εξωτερικής πίεσης συναρτήσει του Ovalization για τον εσωτερικό δακτύλιο

6.3 Κατεργασία κατασκευής

Η κατεργασία κατασκευής του σωλήνα TFP είναι όμοια με την κατεργασία που περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 4.1.1 του 4^{ου} κεφαλαίου. Επίσης η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση της κατεργασίας είναι όμοια με αυτή της παραγράφου 4.2. Υπενθυμίζουμε ότι, δημιουργούμε ένα πρώτο βήμα (step 1) στο οποίο επιβάλλουμε διαφορά θερμοκρασίας στον εξωτερικό δακτύλιο. Στη συνέχεια (step 2) διατηρώντας την θερμοκρασιακή διαφορά επιβάλλουμε στον εσωτερικό δακτύλιο εσωτερική πίεση. Στο 3^ο και τελευταίο βήμα (step 3) αποδεσμεύουμε την εσωτερική πίεση και επαναφέρουμε την θερμοκρασία του εξωτερικού δακτυλίου στην αρχική της τιμή, ώστε οι 2 δακτύλιοι να έχουν ίδια θερμοκρασία.

Πραγματοποιήθηκαν 2 περιπτώσεις πειραμάτων:

- ο Στην πρώτη περίπτωση (Test Case 1) η διαφορά θερμοκρασίας είναι $\Delta T = 225 - 20 = 205 K$ και η εσωτερική πίεση $P_{int} = 150 MPa$.
- ο Στη δεύτερη περίπτωση (Test Case 2) η διαφορά θερμοκρασίας είναι $\Delta T = 300 - 20 = 280 K$ και η εσωτερική πίεση $P_{int} = 100 MPa$.

Παρουσιάζουμε αναλυτικά τη συμπεριφορά του αγωγού σε κάθε στάδιο της κατεργασίας για την πρώτη περίπτωση (TC1).

6.3.1 Θερμική διαστολή εξωτερικού σωλήνα

Η διαδικασία κατασκευής του σύνθετου σωλήνα απαιτεί όπως προαναφέραμε, την θέρμανση του εξωτερικού σωλήνα (βήμα 1) από θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_0 = 20^\circ C$ σε θερμοκρασία T .

➤ Αναλυτική λύση

Η μετατόπιση Δr του κόμβου 4 από την παραπάνω μεταβολή της θερμοκρασίας είναι :

$$\Delta r = a_0 \times \Delta T (1 + \nu) r = 1.16 \cdot 10^{-5} \times 205 \times 1.3 \times 32.98904 \Rightarrow$$

$$\Delta r = 0.102mm$$

➤ Υπολογιστική λύση

Συγκρίνουμε την αναλυτική λύση με την υπολογιστική λύση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων από το step 1 της αριθμητικής προσομοίωσης.

Η οριζόντια μετατόπιση λοιπόν του κόμβου 4 λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς είναι :

$$u_{1,o}^4 = 0.1021mm$$

Το κενό λοιπόν που προκύπτει από τη θέρμανση του εξωτερικού δακτυλίου είναι :

$$g = g_0 + u_{1,o}^1 = 0.145 + 0.0913 = 0.2363mm$$

6.3.2 Εσωτερική πίεση

Το δεύτερο βήμα (step 2) της κατεργασίας είναι η επιβολή εσωτερικής πίεσης στον εσωτερικό σωλήνα. Η εσωτερική πίεση που επιβάλαμε είναι $P_{int} = 150MPa$. Θυμίζουμε ότι η πίεση πλήρους πλαστικοποίησης της διατομής για τον εσωτερικό δακτύλιο είναι $P_y = 34.4MPa$

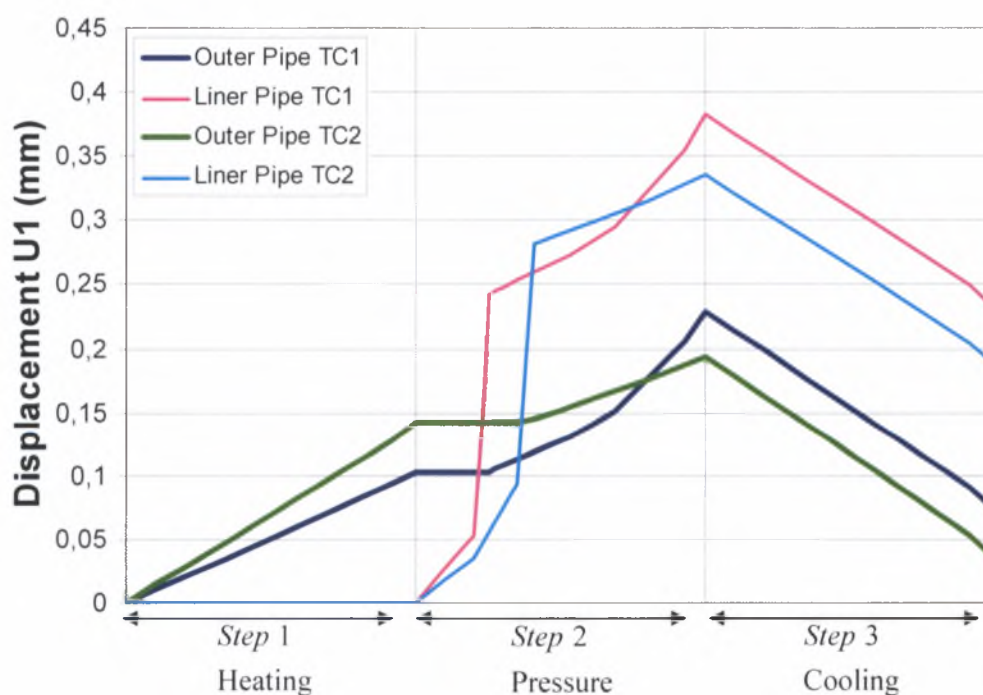
Επαφή των 2 δακτυλίων θα έχουμε όταν η μετατόπιση της εξωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού δακτυλίου φθάσει την τιμή 0.2363mm ή όταν η εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού δακτυλίου αρχίσει να μετατοπίζεται. Αυτό σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παίρνουμε από το “**odb field output**” συμβαίνει σε πίεση μεταξύ 37,74 MPa και 40,905 MPa δηλαδή όπως είναι λογικό λίγο μετά την πλήρη πλαστικοποίηση του δακτυλίου. Από αυτό το σημείο και έπειτα, οι 2 σωλήνες βρίσκονται πλέον σε επαφή ενώ η εσωτερική πίεση P_{int} συνεχίζει να αυξάνει έως την τιμή 150MPa.

Στο τέλος αυτού του βήματος, η οριζόντια μετατόπιση του κόμβου 4 του εξωτερικού δακτυλίου, από $u_{1,o}^4 = 0.1021mm$ όπου ήταν στο τέλος του step 1, γίνεται $u_{1,o}^4 = 0.2286mm$. Αντίστοιχα για τον εσωτερικό δακτύλιο η μετατόπιση του κόμβου 44 από $u_{1,i}^{44} = 0.0 mm$ στο τέλος του step 1 γίνεται $u_{1,i}^{44} = 0.3822mm$.

6.3.3 Ψύξη εξωτερικού σωλήνα

Στο τρίτο και τελευταίο βήμα της κατεργασίας (step 3) έχουμε την αποδέσμευση της εσωτερικής πίεσης και την επαναφορά της θερμοκρασίας στην αρχική τιμή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συρρίκνωση του ενωμένου πλέον σωλήνα. Στο τέλος αυτού του βήματος η μετατόπιση του εξωτερικού δακτυλίου από $u_{l,o}^4 = 0.2286\text{mm}$ στο τέλος του (step 2) γίνεται $u_{l,o}^4 = 0.0735\text{mm}$

Παρακάτω απεικονίζεται γραφικά η μετατόπιση των δακτυλίων συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας και για τις 2 περιπτώσεις πειραμάτων που πραγματοποιήσαμε. Πιο συγκεκριμένα απεικονίζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις του κόμβου 4 του εξωτερικού δακτυλίου και του κόμβου 44 του εσωτερικού δακτυλίου ως αντιπροσωπευτικές για τους 2 δακτυλίους.



Σχήμα 6.7 : Διάγραμμα μετατόπισης συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας

Στο τέλος της κατεργασίας, η εξωτερική διάμετρος του εξωτερικού δακτυλίου από 73mm στην απαραμόρφωτη κατάσταση γίνεται 73.14 mm για το Test Case 1 και 73.07 mm για το Test Case 2.

Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι καθοριστικός παράγοντας στην τελική διάσταση του αγωγού είναι η εσωτερική πίεση. Στο Test Case 1 όπου η εσωτερική πίεση είναι $P_{int} = 150MPa$ έχουμε μεγαλύτερη μετατόπιση από το Test Case 2 όπου η εσωτερική πίεση έχει τιμή $P_{int} = 100MPa$.

6.4 Παραμένουσες τάσεις

Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε την κατεργασία κατασκευής του σύνθετου σωλήνα TFP. Σε αυτή την παράγραφο θα εστιάσουμε στη δημιουργία των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από αυτή την κατεργασία.

Αρχικά μελετάμε τις παραμένουσες τάσεις όπως αυτές διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ώστε να βρούμε το στάδιο που επιβαρύνει περισσότερο τον δακτύλιο με παραμένουσες τάσεις. Στη συνέχεια απεικονίζουμε γραφικά την κατανομή στον δακτύλιο. Τέλος, μελετάμε την επιρροή τους από την μεταβολή της θερμοκρασιακής διαφοράς και της εσωτερικής πίεσης

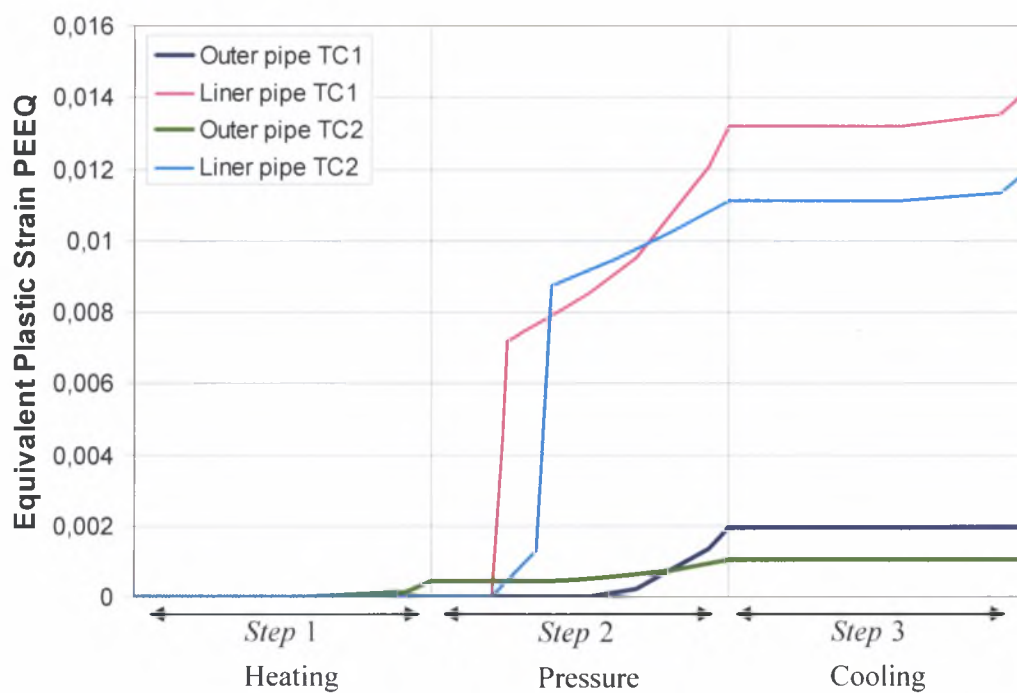
Οι μεταβλητές που εξετάζουμε είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (PEEQ), η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises, η συνολική λογαριθμική παραμόρφωση LE και η περιμετρική τάση S σε συγκεκριμένες διατομές του δακτυλίου.

Εστιάζουμε την μελέτη μας στον κόμβο 4 για τον εξωτερικό δακτύλιο και στον κόμβο 44 για τον εσωτερικό δακτύλιο (Πίνακας 6.2).

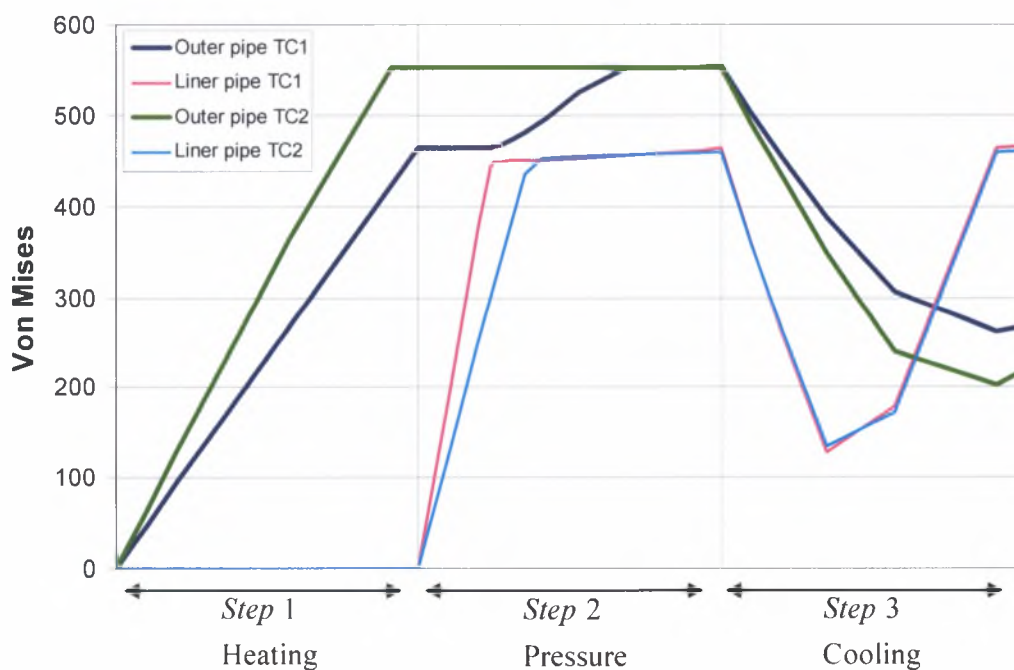
Αρχικά, όπως προαναφέραμε, μελετάμε τις παραμένουσες τάσεις όπως αυτές διαμορφώνονται στα διάφορα στάδια της διαδικασίας.

Πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις για τις 2 περιπτώσεις πειραμάτων.

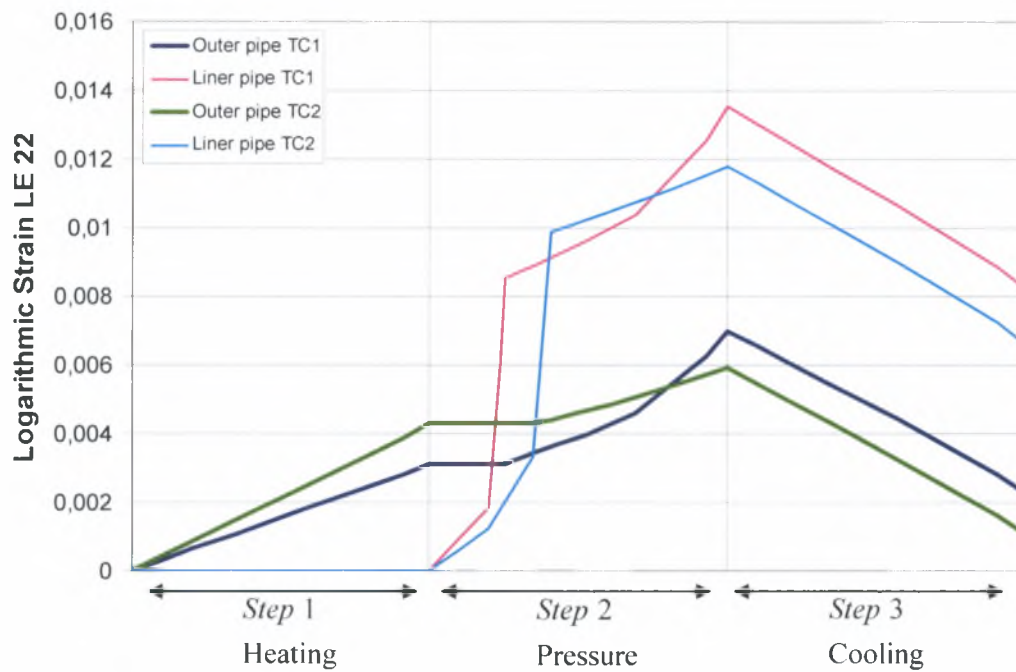
- ο Για το Test Case 1 όπου $\Delta T = 205K$ και $P_{int} = 150MPa$
- ο Για το Test Case 2 όπου $\Delta T = 280K$ και $P_{int} = 100MPa$



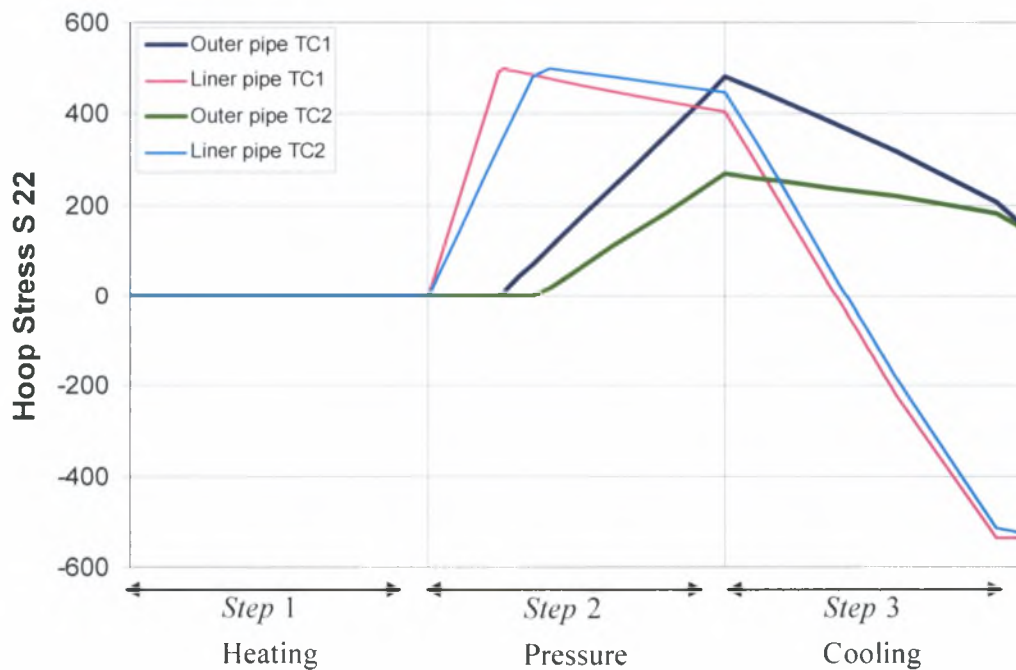
Σχήμα 6.8 (α) : Διάγραμμα ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας



Σχήμα 6.8 (β) : Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης κατά "Von Mises" συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας



Σχήμα 6.8 (γ) : Διάγραμμα συνολικής λογαριθμικής παραμόρφωσης συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας



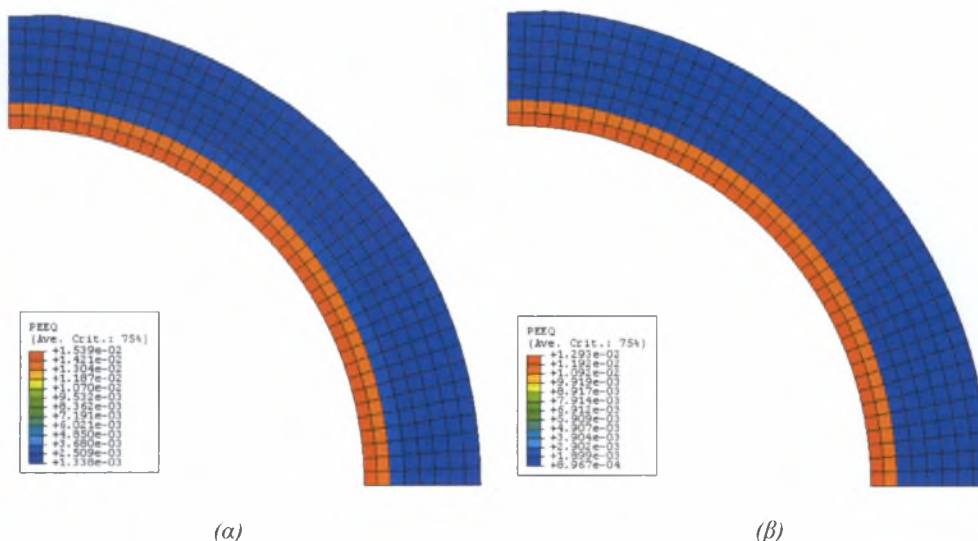
Σχήμα 6.8 (δ) : Διάγραμμα περιμετρικής τάσης συναρτήσει των βημάτων της κατεργασίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι οι περισσότερες παραμένουσες τάσεις δημιουργούνται στο στάδιο της εσωτερικής πίεσης. Οπότε καθοριστικός παράγοντας στη δημιουργία αυτών των τάσεων είναι το μέγεθος της εσωτερικής πίεσης που επιβάλλουμε. Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγούμαστε αν παρατηρήσουμε ότι στο Test Case 1 στο οποίο επιβάλλουμε μεγαλύτερη εσωτερική πίεση από το Test Case 2 ($P_{int} = 150 MPa$ έναντι $P_{int} = 100 MPa$) δημιουργούνται μεγαλύτερου μεγέθους παραμένουσες τάσεις.

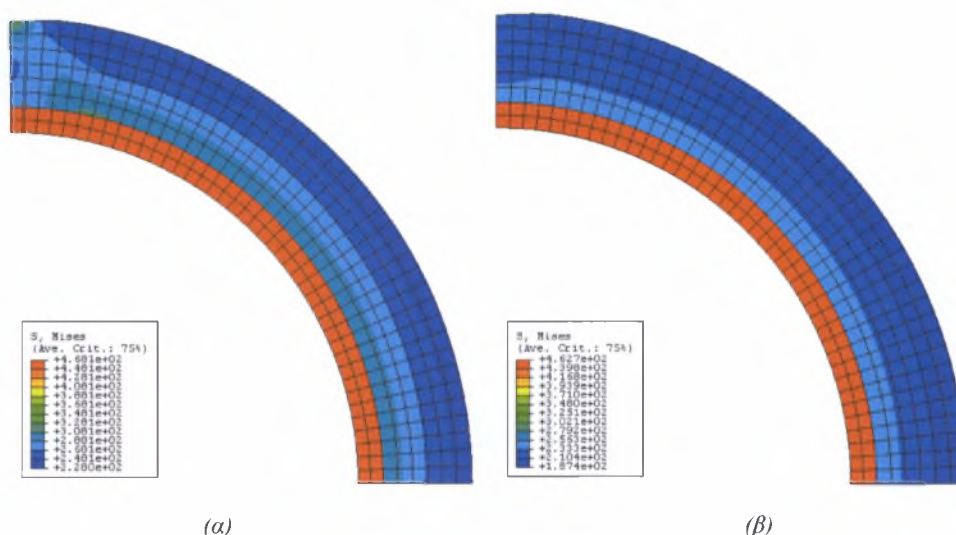
Διαπιστώνουμε επίσης (Σχήμα 6.8:(α)) ότι ο εσωτερικός δακτύλιος πλαστικοποιείται περισσότερο σε σχέση με τον εξωτερικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο εσωτερικός δακτύλιος είναι πιο λεπτός από τον εξωτερικό, ο εσωτερικός δακτύλιος έχει μικρότερο όριο διαρροής και τέλος στο γεγονός ότι είναι ο δακτύλιος στον οποίο επιβάλλουμε την εσωτερική πίεση.

Τα μεγέθη που απεικονίζουμε στα Σχήματα 6.8 (γ) & (δ) είναι της παραμόρφωσης LE22 και της τάσης S22 αντίστοιχα αφού οι κόμβοι (4 του εξωτερικού δακτυλίου και 44 του εσωτερικού) που μελετάμε βρίσκονται στη διατομή $\theta=0$.

Τα επόμενα σχήματα απεικονίζουν γραφικά την κατανομή των μεγεθών που μελετάμε όπως αυτά διαμορφώνονται στο τέλος της κατεργασίας για τις 2 περιπτώσεις πειραμάτων TC1 & TC2.



Σχήμα 6.9 : Κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (α) για TC1 & (β) για TC2



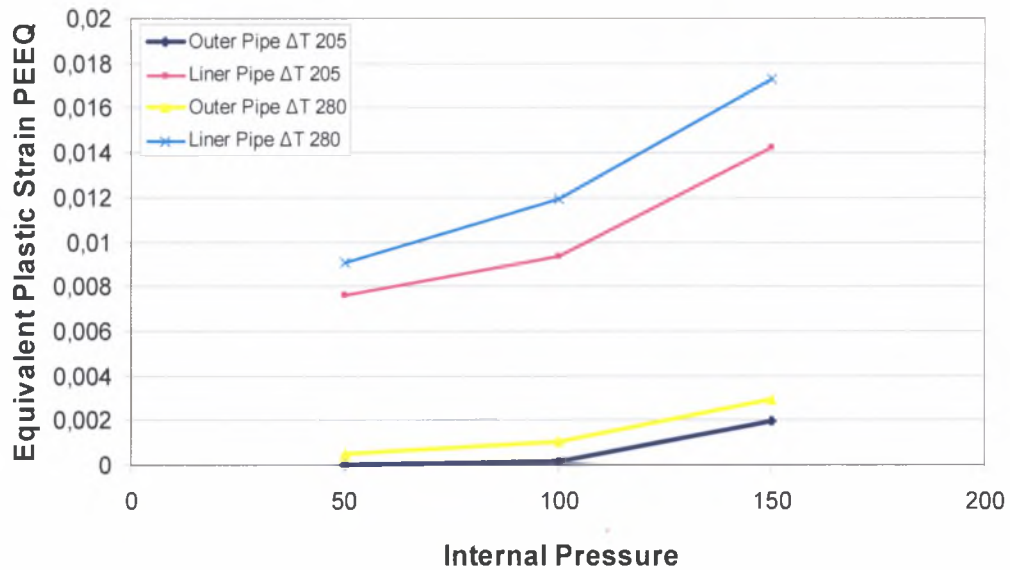
Σχήμα 6.10 Κατανομή της ισοδύναμης τάσης “Von Mises” (α) για TC1 & (β) για TC2

Παρατηρούμε από τα ανωτέρω διαγράμματα ότι οι παραμένουσες τάσεις για το Test Case 1 (όπου επιβάλλεται μεγαλύτερη εσωτερική πίεση) είναι μεγαλύτερου μεγέθους από αυτές που προκύπτουν στην περίπτωση του Test Case 2.

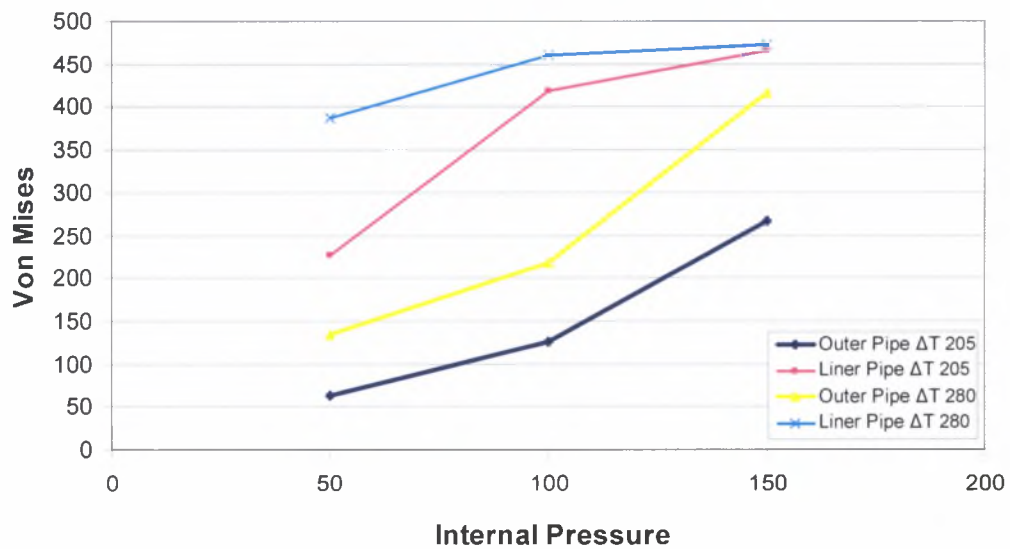
Επίσης βλέπουμε ότι ο εσωτερικός δακτύλιος έχει μεγαλύτερου μεγέθους παραμένουσες τάσεις από τον εξωτερικό.

Τέλος διαπιστώνουμε ότι η κατανομή είναι γενικά ομοιόμορφη περιφερειακά του δακτυλίου, εκτός από την περιοχή που βρίσκεται η ατέλεια, όπου εκεί παρατηρούνται μεγαλύτερες τάσεις και παραμορφώσεις.

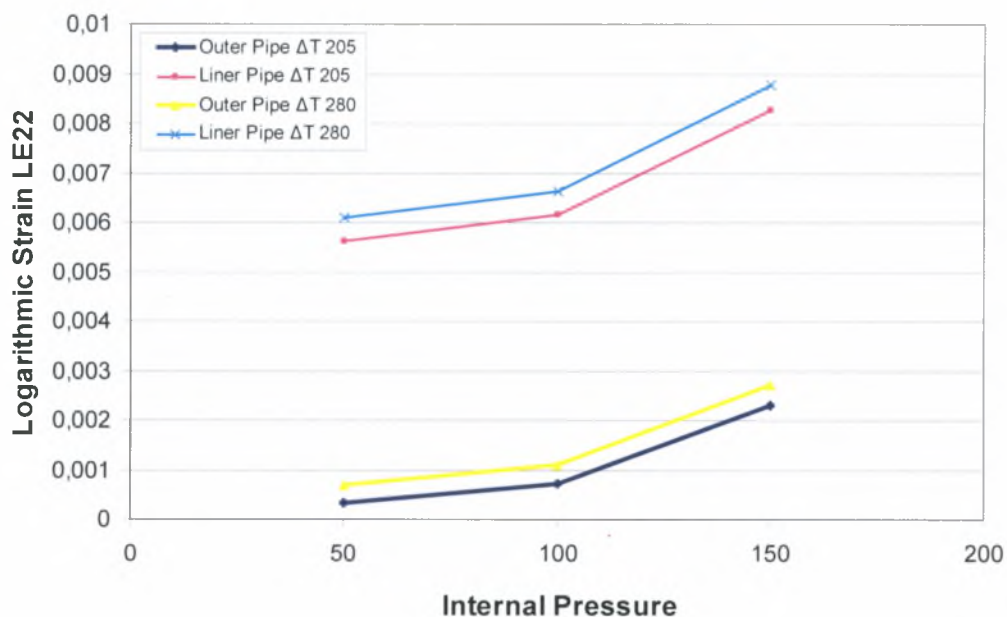
Τελειώνουμε την αναφορά μας στις παραμένουσες τάσεις, που δημιουργούνται από την κατεργασία κατασκευής, παρουσιάζοντας στα επόμενα διαγράμματα την επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας, δηλαδή της μεταβολή θερμοκρασίας και της εσωτερικής πίεσης, στις παραμένουσες τάσεις.



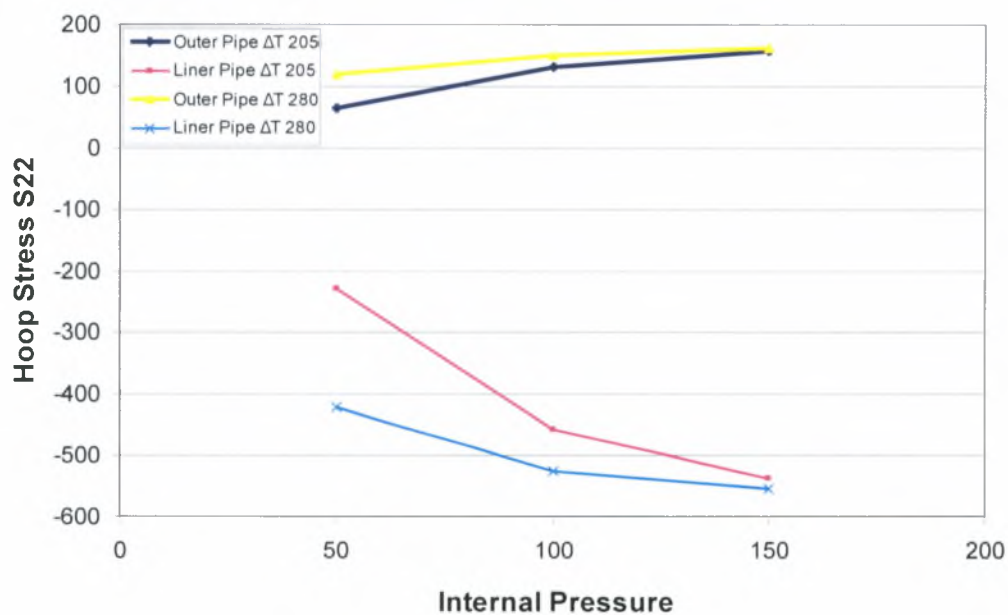
Σχήμα 6.11 (α) : Διάγραμμα παραμένουσας ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης



Σχήμα 6.11 (β) : Διάγραμμα παραμένουσας ισοδύναμης τάσης κατά "Von Mises"



Σχήμα 6.11 (γ) : Διάγραμμα παραμένουσας συνολικής λογαριθμικής παραμόρφωσης



Σχήμα 6.11 (δ) : Διάγραμμα παραμένουσας περιμετρικής τάσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι οι παραμένουσες τάσεις γενικά αυξάνονται όσο αυξάνεται η εσωτερική πίεση ή η διαφορά θερμοκρασίας. Αυτό όπως είναι αναμενόμενο, πρόκειται να επηρεάσει την αντοχή του αγωγού.

6.5 Εξωτερική πίεση

Στις προηγούμενες παραγράφους μελετήσαμε την κατεργασία κατασκευής του σωλήνα TFP μεγάλου πάχους και στη συνέχεια υπολογίσαμε τις παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται από αυτή την κατεργασία. Επίσης εξετάσαμε την επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας στις παραμένουσες τάσεις.

Σ' αυτή την παράγραφο θα εξετάσουμε την αντοχή του αγωγού TFP σε εξωτερική πίεση.

Συνεχίζοντας την προσομοίωση που κάναμε για την μελέτη της κατεργασίας κατασκευής στην παράγραφο 6.3 προσθέτουμε ένα τέταρτο βήμα (step 4) στο οποίο επιβάλουμε εξωτερική πίεση στον σωλήνα. Για την επιβολή της πίεσης εφαρμόζουμε τη μέθοδο Riks διότι η συμπεριφορά του μοντέλου κατά την κατάρρευση είναι ένα γεωμετρικά μη γραμμικό πρόβλημα με ασταθή μεταλυσισμική συμπεριφορά.

6.5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής :

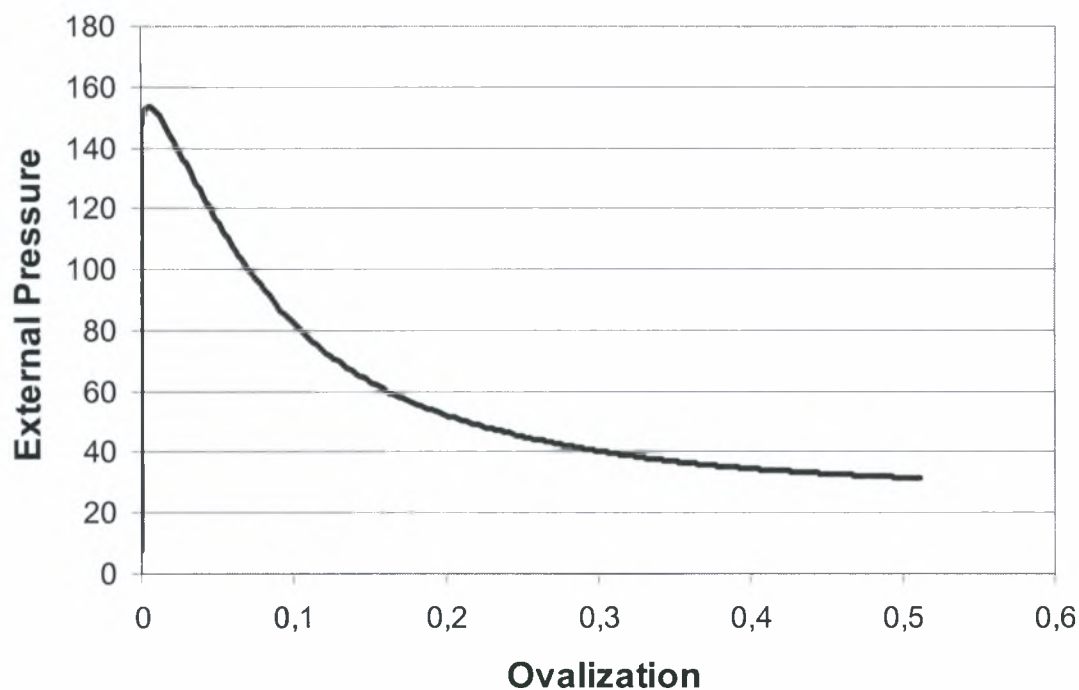
- ο διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = 205K$ στο step 1
- ο εσωτερική πίεση $P_{int} = 150MPa$ στο step 2

Από την προσομοίωση προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της εξωτερικής πίεσης που μπορεί να παραλάβει ο αγωγός TFP χωρίς να αστοχήσει είναι $P_{max} = 153.294MPa$

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζουμε γραφικά την εξωτερική πίεση συναρτήσει της μεταβλητής Ovalization.

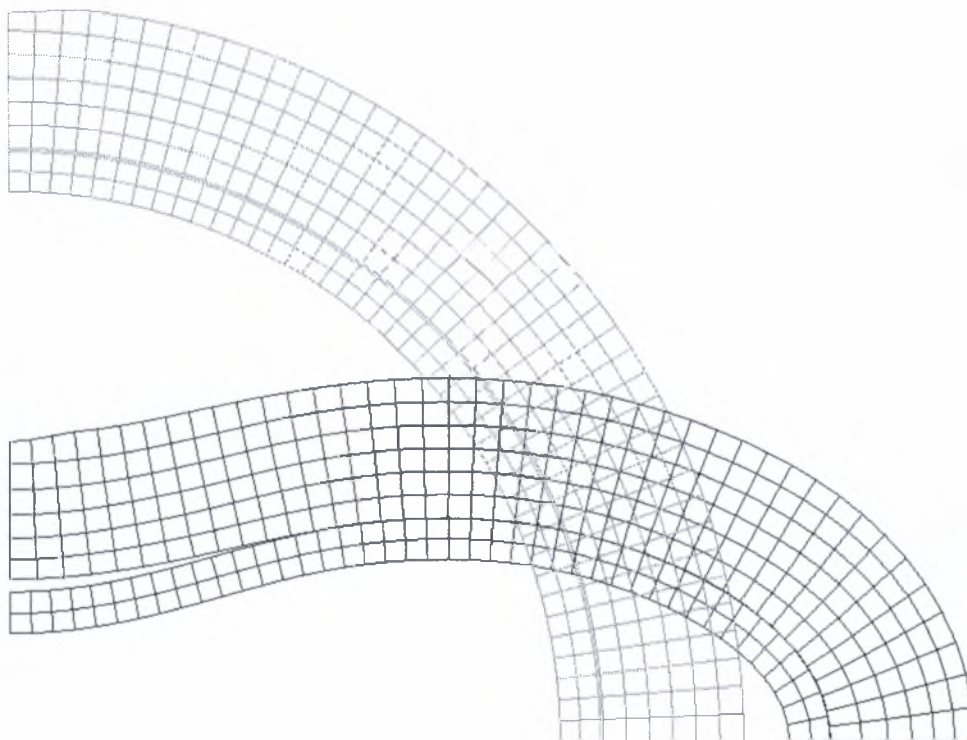
Η μεταβλητή Ovalization (Σχέση 3.6) προσδιορίζεται από τον τύπο

$$J = \frac{\left| w(0) - w\left(\frac{\pi}{2}\right) \right|}{D} \quad \text{όπου } w(\theta) \text{ είναι η ακτινική μετατόπιση συναρτήσει της γωνίας } \theta$$



Σχήμα 6.12 : Εξωτερική πίεση συναρτήσει της μεταβλητής Ovalization

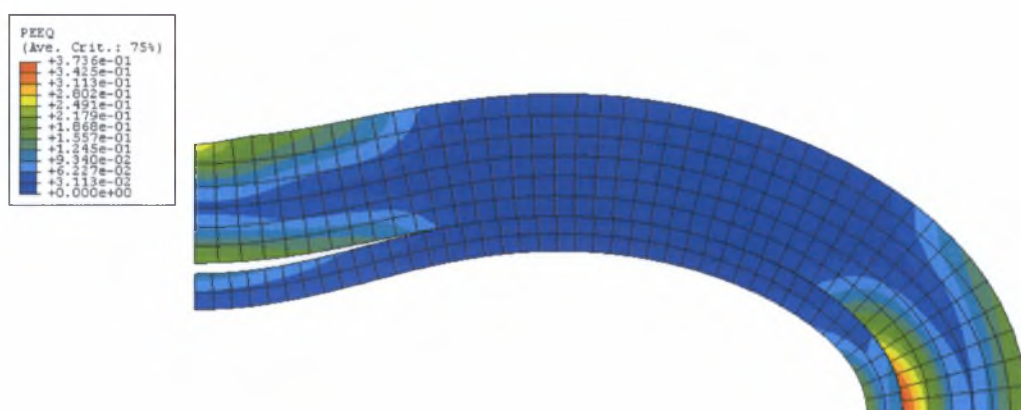
Η εξωτερική πίεση οδηγεί τον δακτύλιο σε κατάρρευση. Η μορφή αυτής της κατάρρευσης “flattening” παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.13 : Μορφή κατάρρευσης σωλήνα

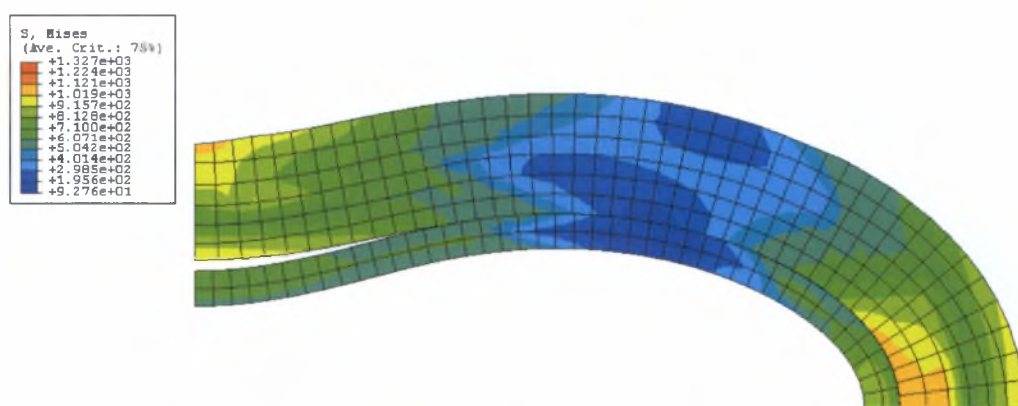
6.5.2 Εντατική κατάσταση

Τα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζουν την κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (Equivalent Plastic Strain, PEEQ) και της ισοδύναμης τάσης κατά “Von Mises” στον δακτύλιο κατά την κατάρρευση.



Σχήμα 6.14 : Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι τα άκρα του δακτυλίου έχουν πλαστικοποιηθεί σημαντικά, ενώ το υπόλοιπο μέρος του δακτυλίου έχει μηδενική πλαστική παραμόρφωση.



Σχήμα 6.15 : Κατανομή ισοδύναμης τάσης κατά “Von Mises”

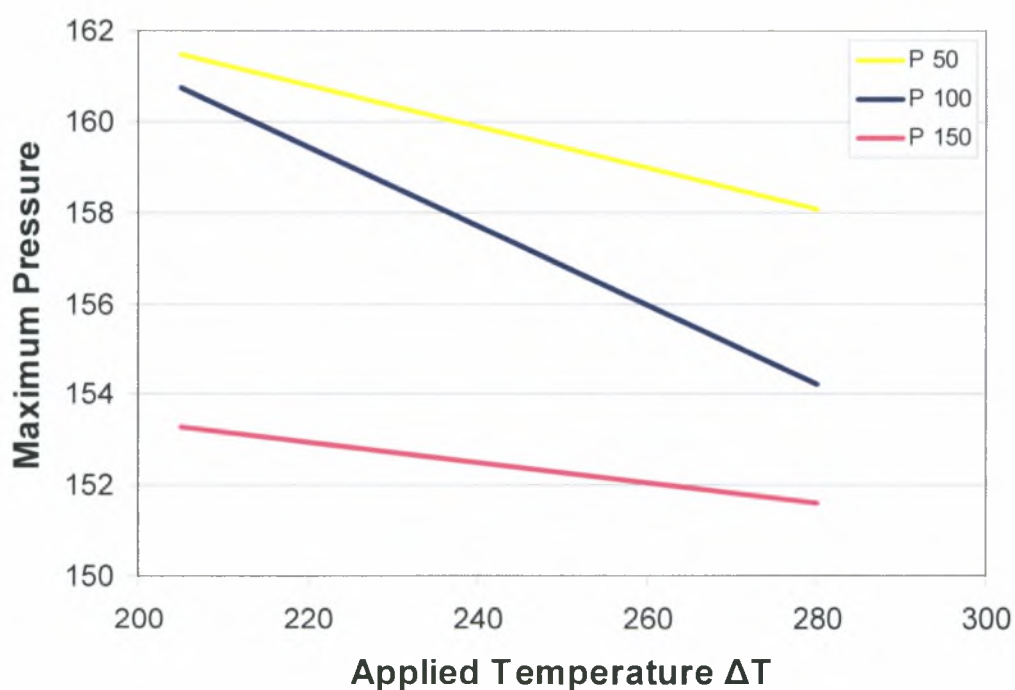
Παρατηρείται ότι οι τάσεις κατά “Von Mises” καταπονούν περισσότερο τον σωλήνα στα άκρα.

6.5.3 Επιρροή των φυσικών παραμέτρων

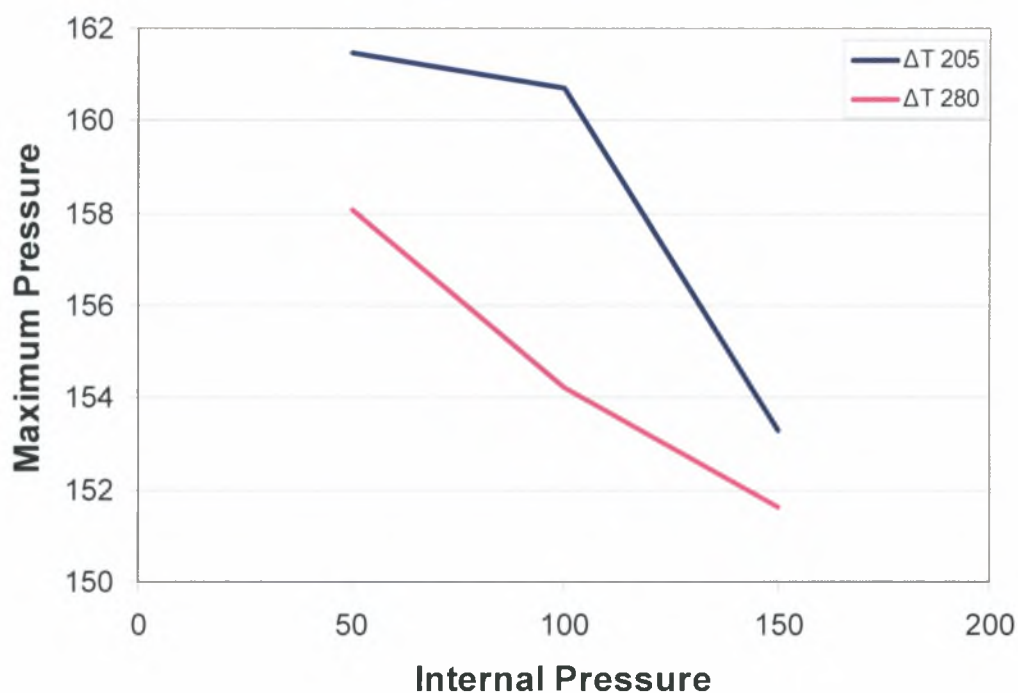
Στην παράγραφο 6.5.1 μελετήθηκε η αντοχή του αγωγού TFP σε εξωτερική πίεση. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- ο διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = 205K$ στο step 1
- ο εσωτερική πίεση $P_{int} = 150MPa$ στο step 2

Σ' αυτή την παράγραφο θα μελετήσουμε την επιρροή της μεταβολής θερμοκρασίας ΔT και της εσωτερικής πίεσης P_{int} , κατά τα στάδια 1 και 2 της κατεργασίας αντίστοιχα, στην αντοχή του σωλήνα.



Σχήμα 6.16 : Διάγραμμα μέγιστης πίεσης συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας



Σχήμα 6.17 : Διάγραμμα μέγιστης πίεσης συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης

Από τα δύο προηγούμενα διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι καθώς αυξάνουμε την θερμοκρασιακή διαφορά στο step 1 ή την τιμή της εσωτερικής πίεσης step 2, μειώνεται η τιμή της μέγιστης πίεσης που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας χωρίς να αστοχήσει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση αυτών των 2 παραμέτρων δημιουργούνται περισσότερες παραμένουσες τάσεις στο σωλήνα κατά την κατεργασία κατασκευής όπως είδαμε στην παράγραφο 6.4.

Συγκρίνοντας την αντοχή του σωλήνα TFP που μελετήσαμε με την αντοχή των δύο σωλήνων που τον αποτελούν, διαπιστώνουμε ότι η αντοχή του σωλήνα TFP (περίπου $P = 155 \text{ MPa}$) είναι σημαντικά μικρότερη από την αντοχή του εξωτερικού σωλήνα ($P_{cr} = 511.31 \text{ MPa}$). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διαδικασία κατασκευής του αγωγού δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις που μειώνουν την αντοχή του. Παρατηρούμε επίσης ότι η αντοχή του σωλήνα TFP είναι λίγο μεγαλύτερη από την αντοχή του εξωτερικού σε πλαστικοποίηση ($P_y = 118.92 \text{ MPa}$), κάτι που σημαίνει ότι καθοριστικός παράγοντας στην τιμή της πίεσης αστοχίας είναι η πλαστικοποίηση του εξωτερικού σωλήνα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την κατεργασία κατασκευής του αγωγού διπλού τοιχώματος (Tight Fit Pipe ή απλά TFP). Εστιάζουμε στη μελέτη των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από αυτή την κατεργασία καθώς και στην επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας κατασκευής, όπως είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας ΔT και η εσωτερική πίεση P_{int} . Τέλος, υπολογίζουμε την αντοχή του αγωγού TFP σε εξωτερική πίεση και εξετάζουμε την επιρροή της από τη μεταβολή των παραμέτρων της κατεργασίας.

Για την παραπάνω μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 2 μοντέλα αγωγών TFP διαφορετικών διαστάσεων (σχετικά μικρού και μεγάλου πάχους). Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ισχύουν και για τις 2 περιπτώσεις πειραμάτων που μελετήθηκαν. Η ανάλυση είναι μη γραμμική και έγινε με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων “ABAQUS”. Η προεπεξεργασία των μοντέλων έγινε εξ’ ολοκλήρου στο module CAE του “ABAQUS” με κατάλληλη προσομοίωση των υλικών, των συνοριακών συνθηκών και των παραδοχών του προβλήματος.

Αρχικά μελετήθηκε η ευστάθεια των δακτυλίων που αποτελούν τον αγωγό TFP. Υπολογίστηκε η αναλυτική λύση από την θεωρία της ευστάθειας των λεπτότοιχων ελαστικών δακτυλίων και έγινε σύγκριση της αναλυτικής λύσης με την υπολογιστική λύση από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρήθηκε πολύ καλή συμφωνία των αναλυτικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων μετά από παραμετρική μελέτη που διεξήχθη ως προς τον τύπο του πεπερασμένου στοιχείου.

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η διαδικασία κατασκευής του σωλήνα TFP στο “ABAQUS” και μελετήθηκαν οι παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την κατεργασία. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι το δεύτερο στάδιο της κατεργασίας (επιβολή εσωτερικής πίεσης) επηρεάζει σημαντικά τις παραμένουσες τάσεις. Επίσης παρατηρήθηκαν μεγαλύτερου μεγέθους παραμένουσες τάσεις στον εσωτερικό σωλήνα, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο μικρότερο πάχος του καθώς επίσης και στο γεγονός ότι είναι ο σωλήνας που παραλαμβάνει το φορτίο (εσωτερική πίεση) σ’ αυτό το δεύτερο στάδιο της κατεργασίας.

Εξετάστηκε επίσης η επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας κατασκευής, όπως είναι το μέγεθος της θερμοκρασιακής διαφοράς στον εξωτερικό σωλήνα και η τιμή της εσωτερικής πίεσης στον εσωτερικό σωλήνα. Αποδείχθηκε από αυτή τη μελέτη, η μεγάλη επιρροή των φυσικών παραμέτρων στη δημιουργία των παραμενουσών τάσεων. Συγκεκριμένα προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασιακή μεταβολή του εξωτερικού σωλήνα ή τιμή της εσωτερικής πίεσης που επιβάλλουμε στον εσωτερικό σωλήνα, τόσο μεγαλύτερες παραμένουσες τάσεις προκύπτουν.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η αντοχή του «κατασκευασμένου» πλέον σωλήνα TFP σε εξωτερική πίεση. Διαπιστώθηκε ότι η αντοχή του σωλήνα TFP είναι μικρότερη από την αντοχή του απλού εξωτερικού δακτυλίου γεγονός που οφείλεται στις παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την κατεργασία. Πραγματοποιήθηκε επίσης μελέτη για την επιρροή των φυσικών παραμέτρων της κατεργασίας κατασκευής στην αντοχή του σωλήνα TFP. Διαπιστώθηκε ότι η αντοχή του σωλήνα επηρεάζεται από την μεταβολή αυτών των παραμέτρων. Ειδικότερα αποδείχθηκε ότι η μέγιστη πίεση που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας χωρίς να αστοχήσει μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασιακής μεταβολής ή με αύξηση της εσωτερικής πίεσης. Εφόσον όμως, όπως αποδείχθηκε, οι μεταβολές των φυσικών παραμέτρων έχουν άμεση επίδραση στις παραμένουσες τάσεις, προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι η αντοχή του αγωγού TFP σε εξωτερική πίεση εξαρτάται από το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από την κατεργασία κατασκευής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] E.S. Focke, A.M. Gresnigt and J. Meek, H. Nakasugi (2004), “The 2-Dimensional Modeling of the Manufacturing Process of Tight Fit Pipe (TFP)”, *Proceedings of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Toulon, France, p. 82-90

- [2] E.S. Focke, A.M. Gresnigt and J. Meek (2005), “Local buckling of thin walled liner pipe”, *Proceedings of the 5th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures*, Salzburg, Austria

- [3] E.S. Focke, A.M. Gresnigt and J. Meek (2006a), “Small Scale Reeling Tests”, Paper No. 2006-AMG-01

- [4] E.S. Focke, A.M. Gresnigt and J. Meek, H. Nakasugi (2006b), “The Influence of Heating of the Liner Pipe during the Manufacturing Process of Tight Fit Pipe”, Paper No. 2006-AMG-02

- [5] M. K. Yeh, S. Kyriakides (1986), “On the Collapse of Inelastic Thick-Walled Tubes Under External Pressure”, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 108 pp. 35-47

- [6] S. Kyriakides, E. Arikan (1983), “Postbuckling Behavior of Inelastic Inextensional Rings Under External Pressure”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50 pp. 537-543



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089092